

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:
MAPA ISOCERÁUNICO GEORREFERENCIADO PARA LA
COORDINACIÓN DE PROTECCIONES FRENTE A DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS.

AUTOR:
MANUEL ALEJANDRO ZURITA ÁLVAREZ

TUTOR:
ING. SILVANA FABIOLA VARELA CHAMORRO

Quito, julio 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Manuel Alejandro Zurita Álvarez con documento de identificación N° 1721785945, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: "MAPA ISOCERÁUNICO GEORREFERENCIADO PARA LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS", mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELÉCTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Manuel Alejandro Zurita Álvarez
CI. 1721785945

Quito, julio del 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Silvana Fabiola Varela Chamorro declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “MAPA ISOCERÁUNICO GEORREFERENCIADO PARA LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS” realizado por Manuel Alejandro Zurita Álvarez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.



Silvana Fabiola Varela Chamorro
CI. 1713565818

Quito, julio del 2020

DEDICATORIA

A Dios, que, con su bendición me ha sacado ileso de las más duras batallas. A mis padres que han luchado conmigo y han sido toda mi vida ejemplo de amor, fortaleza, sabiduría y tenacidad. A mis hermanas, que son mis segundas madres, por todos sus cuidados desde que era niño. A mis sobrinos, que con su inocencia y su sonrisa me llenan el alma todos los días. A mis cuñados, Carlos y Diego, amigos entrañables. A Michelle, mi confidente, mi compañera, mi complemento y mi vida. Esto ha sido un esfuerzo en conjunto porque sin su apoyo no estaría aquí. Gracias a todos.

Alejandro Zurita Álvarez

AGRADECIMIENTOS

De manera especial, quiero agradecer a las personas de NASA, Global Hydrology Resource Center (GHRC) DAAC, por compartir la información necesaria de LIS (Lightning Imaging Sensor) para la creación de este proyecto técnico. Agradecer también al INAMHI, que siempre se mostraron dispuestos a brindar la información que ellos tuviesen en sus bases de datos y el buen trato recibido. De igual forma, gracias a la Ing. Silvana Varela por el tiempo invertido en este proyecto.

Alejandro Zurita Álvarez

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	x
GLOSARIO	xi
ABREVIATURAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN	xviii
PROBLEMA	xx
ANTECEDENTES.....	xxi
IMPORTANCIA	xxii
ALCANCE	xxiii
DELIMITACIÓN	xxiii
OBJETIVO GENERAL	xxiv
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	xxiv
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	25
CAPÍTULO I.....	25
ZONA DE INVESTIGACIÓN	25
1. 1 Empresa Eléctrica Quito, (EEQ S.A).	25
1.1.1 Características generales	25
1.1.2 Formación de la empresa.....	26

1.2 Geografía	27
1.3 Clima	27
1.4 Estaciones meteorológicas dentro de la zona de investigación.	29
CAPÍTULO II	32
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	32
2.1 Origen de las descargas atmosféricas	32
2.1.1 Formación de la descarga atmosférica.	32
2.1.2 Teorías de formación de descargas atmosféricas.	32
2.2 Clasificación de los rayos.	35
2.3 Afectaciones por descargas atmosféricas.	36
2.3.1 Norma IEC 62305.	37
2.3.4 Pérdida de vida humana por descargas atmosféricas	40
2.3.5 Daños materiales por descargas atmosféricas	41
CAPÍTULO III	42
PROTECCIONES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	42
3.1 Planeación contra descargas atmosféricas.	42
3.1.1 Mapa isocerámico.	42
3.1.2 Mapas satelitales	43
3.2 Sistemas de protecciones.	47
3.2.1 Fusibles.	48
3.2.2 Apartarrayos	48
3.2.3 Pararrayos	49
3.2.4 Puntas Franklin	49
3.2.5 Hilos de guarda.	50
3.2.6 Aislamientos	51
3.2.7 Sistemas de tierra	53
3.2.8 Relés	55

3.2.9 Protecciones por sitio	57
3.3 Medidas de protección contra descargas atmosféricas.....	59
3.3.1 Medidas de protección para reducir los daños a personas por tensiones de paso y de contacto.	60
3.3.2 Medidas de protección para reducir los daños físicos.	61
3.3.3 Medidas de protección para reducir los fallos de los sistemas eléctricos y electrónicos.....	62
3.3.4 Elección de las medidas de protección.....	63
CAPÍTULO IV	65
INFLUENCIA DEL NIVEL CERÁUNICO EN EL SEP	65
4.1 Cálculo de la densidad de rayos a tierra (DRT) o Ground Flash Density (GFD).	65
4.2 Cálculo de SFR.....	66
4.3 Evaluación de la salida de líneas al año por caída de rayos.	68
CAPÍTULO V	69
MARCO METODOLÓGICO	69
5.1 Mapa isoceraúnico y densidad de descargas atmosféricas.	69
5.2 Programación en el software Matlab.....	91
RESULTADOS	104
CONCLUSIONES	109
RECOMENDACIONES	110
REFERENCIAS	111
ANEXOS.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Línea histórica EEQ.....	27
Figura 2. Probabilidad diaria de precipitación en Quito. Fuente: [12].....	29
Figura 3. Puntos calientes o “hot-spots” de descargas atmosféricas del planeta Tierra. Fuente: [14]	35
Figura 4. Tipos de pérdidas causadas por las descargas atmosféricas y riesgos asociados a los distintos tipos de daño.	38
Figura 5. Muertes en Ecuador a causa de tormenta eléctrica. Fuente: [16]	40
Figura 6. Mapa isoceráunico del Ecuador continental. Fuente: [9]	43
Figura 7. Descargas totales desde el 01 de enero 2018 al 31 de diciembre 2018, día y noche. Fuente: [18]	45
Figura 8. Descargas totales desde el 01 de Enero 2019 al 21 de Noviembre 2019, día y noche. Fuente: [18]	46
Figura 9. Clases y formas de sobrevoltajes. Fuente: [22]	52
Figura 10. Riesgo de descargas atmosféricas y daños en BV. Fuente: [20]	57
Figura 11. Tramo de línea aérea y su malla inicial “imaginaria” para cálculos de diseño. Fuente: [27]	67
Figura 12. Dispersión de los datos de densidad de rayos a tierra (Descargas/km ² - año).....	71
Figura 13. Búsqueda de un valor mediante puntos cercanos.	85
Figura 14. Área de concesión EEQ, con grilla de puntos para extraer los datos disponibles del satélite LIS.....	89
Figura 15. Densidad de descargas atmosféricas separado por trimestres.	90
Figura 16. LRFC tasa de descargas atmosféricas media anual de LIS y OTD combinados, rejilla de 2.5 °. Con un zoom hacia la parte de Ecuador. Fuente: [30]	91
Figura 17. La región bidimensional está dividida en cuadrados de longitud h por lado. Donde el potencial V0 es aproximadamente igual al promedio de los potenciales de los cuatro puntos vecinos.....	93
Figura 18. Aproximación a valores cercanos de latitud y longitud al dato ingresado por pantalla del GUI, Matlab.....	96
Figura 19. Flujograma implementado para la aplicación hecha en Matlab (Parte1).....	102

Figura 20. Flujograma implementado para la aplicación hecha en Matlab (Parte2), control de errores.....	102
Figura 21. Flujograma implementado para la conversión de coordenadas UTM a coordenadas geográficas decimales, y control de errores.	103
Figura 22. Ventana principal del programa.....	104
Figura 23. Ingreso de coordenadas de latitud y longitud en la ventana principal del programa.	105
Figura 24. Resultados del programa, nivel cerámico y densidad de rayos a tierra, con sus respectivas unidades.	105
Figura 25. Ventana que se despliega al presionar “Coordenadas UTM”.....	106
Figura 26. Resultados desplegados al ingresar por teclado las coordenadas UTM se obtiene la latitud y longitud decimal.....	106
Figura 27. Mapa Isocerámico del área de concesión de la EEQ.	107
Figura 28. Mapa de densidad de descargas atmosféricas, del área de concesión de la EEQ.....	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del INAMHI dentro del área de concesión de la EEQ...	30
Tabla 2. Estaciones meteorológicas de la Secretaría del Ambiente dentro del área de concesión de la EEQ.	30
Tabla 3. Organismos internacionales encargados de investigar y divulgar normas, estándares.	36
Tabla 4. Nivel de aislamiento según la Norma IEC 60071-1	53
Tabla 5. Protecciones para elementos principales de subestaciones.	58
Tabla 6. Protecciones para elementos en líneas, en las distintas etapas del SEP.	58
Tabla 7. Relaciones empíricas entre la densidad de descargas de rayos a tierra (DRT) y los días con tormenta en un año (Td). Fuente: [26].....	66
Tabla 8. Resumen de abreviaturas para meses del año y su estación climática. Fuente: [24]	70
Tabla 9. Puntos obtenidos con sector, latitud y longitud, y los valores de (descargas/km ² -año) y nivel isoceraúnico, (Número anual de días con tormenta eléctrica).....	84
Tabla 10. Nivel ceráunico y densidad de descargas atmosféricas dentro de la ciudad de Quito	88
Tabla 11. Nombre de las variables de los vectores de latitud y de longitud mayores o menores al dato ingresado.....	95

GLOSARIO

- **Electrón:** Es la partícula más pequeña que sigue caracterizando a un elemento químico. Tiene un núcleo de carga positiva con más del 99.9% de su masa y electrones con carga negativa que determinan su tamaño. (Z es el número de protón y e la carga elemental).
Actualmente existen subdivisiones más pequeñas de partículas que conforman al electrón y protón, pero es campo de la física-cuántica.

- **Valencia:** La valencia es el máximo número de átomos univalentes como el hidrógeno o el cloro que pueden intercambiar electrones para completar su último nivel de energía, es decir indican cierta inestabilidad en un elemento químico.

- **Carga (Q):** La carga es una propiedad física de partículas subatómicas, en donde se manifiesta mediante electromagnetismo. Su unidad es el Coulomb. La carga también representa la cantidad de carga eléctrica que es transportada en un segundo por una corriente de un amperio.

$$1C = 6.24 * 10^{18} \text{ Electrones}$$

Y la carga eléctrica elemental es, la carga de un electrón: $1,602\ 176\ 487 \times 10^{-19} \text{ C}$

- **Voltaje (V):** El voltaje es el trabajo por unidad de carga, que se debe realizar para mover dicha carga desde una referencia a un punto considerado. Su unidad es el Volt (Julio/C). El voltio es la diferencia de potencial eléctrico que existe entre dos puntos de un hilo conductor que transporta una corriente constante de 1 amperio, cuando la potencia disipada entre estos puntos es igual a 1 vatio.
- **Corriente (I):** El amperio es la intensidad de corriente constante que, si se mantiene entre dos conductores paralelos, rectilíneos, con una longitud infinita, de sección circular despreciable y ubicados a distancia de 1 metro uno del otro, en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud.
- **Energía:** El julio es el trabajo que se realiza cuando en el punto de aplicación de la fuerza, se aplica 1 newton y se desplaza una distancia de 1 metro en la dirección de la fuerza, es decir (N.m). Ahora, en un sentido eléctrico, la energía que es representada por un julio, es el trabajo

necesario para mover una carga eléctrica de un culombio a través de una tensión (diferencia de potencial) de un voltio. Es decir, un voltio-culombio ($V \cdot C$).

Densidad de flujo eléctrico (D): Mientras que el flujo eléctrico Ψ es una cantidad escalar, la densidad del flujo eléctrico, D , es un campo vectorial que toma la dirección de las líneas de flujo, si esta cruza el área diferencial dS normales a un punto. Donde sus unidades son: $\left[\frac{C}{m^2} \right]$

Densidad de flujo magnético (B): Como D , la intensidad del campo magnético H depende solo de las cargas (en movimiento) y es independiente del medio. El campo de fuerza asociado con H es la densidad de flujo magnético B . Donde μ es la permeabilidad del medio. La unidad de B es el Tesla. $[T]$.

Campo eléctrico (E): También se lo llama intensidad de campo eléctrico, es una fuerza que produce un “stress” en los materiales aislantes; o más formalmente, la intensidad de campo eléctrico E , debida a una Q se define como la fuerza por unidad de carga sobre Q_t . Donde sus unidades son el $[N/C]$ o el $[V/m]$.

:

Campo magnético (H): Está definido por la ley de Biot-Savart y nos dice que un diferencial de intensidad de campo magnético dH se produce por un elemento diferencial de corriente I en este caso, dI . Todos los elementos que conforman el filamento de corriente contribuyen a H y deben incluirse, sus unidades son: $[A/m]$.

- **Rigidez dieléctrica:** La rigidez dieléctrica es el máximo gradiente de potencial que puede sostener o soportar un aislante antes de que se produzca una disrupción. Esta disrupción es una corriente eléctrica, que bajo acción de un campo eléctrico tratan de mover los electrones en dirección opuesta a la intensidad del campo, puede causar la ruptura de aislantes sólidos, o descargas tipo impulso en líquidos y gases.

Existen ciertos factores que afectan al aislamiento y son: Temperatura, tiempo, frecuencia, humedad, constante dieléctrica, espesor.

- **Descarga atmosférica:** La descarga atmosférica es un fenómeno de la naturaleza que se presenta en forma de plasma, y dura unos instantes. En donde se produce una descarga abrupta de iones que si su valor es elevado se genera la descarga eléctrica. Existen distintas teorías sobre

la formación de rayos. Para su estudio, se lo clasifica en un apartado llamado sobrevoltajes tipo externo.

- **SPCR. “Sistema de protección contra el rayo”:** Instalación completa destinada a reducir los daños físicos debidos a los impactos directos de los rayos en la estructura. Nota: Está formada por sistemas externos e internos de protección contra el rayo.
- **NPR. “Nivel de protección contra el rayo”:** Cifra relacionada con un conjunto de parámetros de la corriente del rayo y relativa a la probabilidad de que los valores máximos y mínimos de diseño asociados no se sobrepasen cuando aparezcan rayos naturales. Nota: Se emplea un nivel de protección contra el rayo para diseñar medidas de protección de acuerdo al conjunto de parámetros relevantes de la corriente del rayo.
- **IEMR. “Impulso Electromagnético del Rayo”:** Efectos electromagnéticos debidos a la corriente del rayo. Incluyen tanto las ondas de choque conducidas, así como los efectos de campo electromagnético radiado.

ABREVIATURAS

EEQ: Empresa Eléctrica Quito.

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

BV: Bajo Voltaje.

MV: Medio Voltaje.

AV: Alto Voltaje.

DRT: Densidad de Descargas Atmosféricas a Tierra.

GFD: (Ground Flash Density, Densidad de Descargas Atmosféricas a Tierra).

Td: Nivel cerámico.

INECEL: Instituto Ecuatoriano de Electrificación (desaparecido actualmente).

LIS: (Lightning Imaging Sensor, Sensor de Imágenes de Descargas Atmosféricas).

WWLLN: (World Wide Lightning Location Network, Red Mundial de Localización de Rayos).

SEP: Sistemas Eléctricos de Potencia.

RESUMEN

En el presente documento se hace un estudio profundo sobre la incidencia de las descargas atmosféricas dentro del área de concesión de la EEQ. Se ha desarrollado una plataforma informática con la cual se puede determinar el nivel ceráunico y el nivel de densidad de descargas atmosféricas, en un punto georreferenciado deseado. En donde, el usuario ingresa datos de longitud y latitud, en coordenadas geográficas o si posee coordenadas UTM, puede realizar una conversión dentro de la misma plataforma. Complementariamente, se ha creado un mapa isoceráunico y un mapa de densidad de descargas atmosféricas a tierra. Ambos se diferencian en que el mapa isoceráunico muestra los días con tormenta eléctrica en el año, mientras que, el mapa de densidad de descargas atmosféricas, muestra la cantidad de descargas atmosféricas que han caído dentro de 1 km² en el lapso de 1 año. Para lograr esto, se utilizaron los datos del sensor satelital LIS (Lightning Imaging Sensor) en el periodo de 1998 hasta el 2013. La importancia de esta plataforma, y de la creación de estos mapas, recae en que las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos de la naturaleza más violentos, por lo que, este proyecto técnico, ha desarrollado instrumentos de planeación para la protección contra descargas atmosféricas. Cabe recalcar que, un mal diseño de protecciones, genera gran pérdida económica, este mal dimensionamiento se da cuando, se hacen consideraciones de caída de descargas atmosféricas menor a la realidad (subdimensionado) o mayor a la realidad (sobredimensionado), ambos casos generan pérdidas económicas por los siguientes factores: En un apantallamiento subdimensionado pueden caer una gran cantidad de descargas atmosféricas sobre L/T, esto aumenta transitorios en la red, puede dañar equipos y máquinas, además podría sacar de servicio a una línea, entre otras cosas. En un apantallamiento sobredimensionado, la pérdida económica se genera en la compra de los materiales o instrumentos que no son necesarios técnicamente, se coloca más de lo necesario, hay ineficiencia por desconocimiento de la cantidad de descargas atmosféricas que caen en la zona. Para que no suceda esto, el presente proyecto técnico brinda información que permita tomar decisiones oportunas respecto al diseño de protecciones, ya que la identificación del área geográfica concreta donde hay mayor incidencia de rayos es de gran importancia, tanto para proyectos de líneas de transmisión, subtransmisión, distribución, y subestaciones, así como para la construcción de proyectos civiles como edificios, centros comerciales, etc. Una vez

analizados los datos, se concluye que los meses de septiembre, octubre y noviembre son muy vulnerables a que existan tormentas eléctricas. La región oriental del área de estudio, recibe la mayor parte de estas descargas atmosféricas. Se profundizará cada uno de los aspectos anteriormente mencionados a lo largo del desarrollo del documento.

ABSTRACT

This document provides an in-depth study on the incidence of atmospheric discharges within the Quito's Electrical Company concession area. An application has been developed with which the isokeraunic level and flash rate density level (FRD) can be determined at a desired georeferenced point. Where, the user enters longitude and latitude data, in geographic coordinates or if he has UTM coordinates, he can perform a conversion within the same platform. In addition, an the isokeraunic map and ground flash density map have been created. The two differ in that the isokeraunic map shows the thunderstorm days in the year, while the ground flash density map, shows the number of atmospheric discharges that have fallen within 1 km² in the span of 1 year. To achieve this, data from the LIS satellite sensor (Lightning Imaging Sensor) was used in the period 1998 to 2013. The importance of this platform, and the creation of these maps, is that, the atmospheric discharges are one of the most violent phenomena of nature, so, this technical project, has developed planning tools for the protection against atmospheric discharges. It should be emphasized that, poor design of protections against lightning, generates great economic loss, this poor sizing occurs when, considerations of atmospheric discharges are less than reality (undersized) or greater than reality (oversized), both cases generate economic losses due to the following factors: In an undersized shielding, can fall a lot of atmospheric discharges over transmission lines, this increases transients in the network, also, this can damage equipment and machines, interrupt the energy service, and other things. Beside, an oversized shield, could cause economic loss, because of, the purchase of materials or instruments that are not technically necessary, there is placed more than necessary, so, this produce an inefficiency because of the unknown amount of atmospheric discharges that fall in the area. In order to prevent this, this technical project provides information that allows to make timely decisions regarding the design of protections, because, this project, helps to identify the specific geographical area where there is the greatest incidence of atmospheric discharges, being interest of shielding projects of transmission lines, subtransmission, distribution, and substations, as well as for the construction of civil projects such as buildings, shopping centers, etc. Once the data is analyzed, it is concluded that the months of September, October and November are very vulnerable to thunderstorms. The eastern region of the study area receives most of these atmospheric discharges. Each of the above aspects will be more analized throughout the development of the document.

INTRODUCCIÓN

Un mapa cerámico es un mapa geográfico que representa una zona o país para determinar el nivel de riesgo de presencia de descargas atmosféricas. Estas descargas, son un tema complejo de entender ya que no es algo simple como, por ejemplo, que un interruptor por el flujo de corriente eléctrica entre los terminales, enciende un foco; debemos abrir nuestra mente, darle paso a la imaginación para que vislumbre partículas subatómicas que después de cierta interacción con el medio permiten, o no, una descarga atmosférica.

Todos los días se generan tormentas eléctricas alrededor del mundo, lo que hace que las personas estén expuestas constantemente a descargas atmosféricas, cabe recalcar que estas tienen dos componentes, el trueno que es la parte auditiva y el relámpago que es el efecto luminoso, los dos juntos forman la descarga atmosférica o rayo. La descarga atmosférica es un efecto en cascada, en donde los átomos son ionizados cuando el medio es sometido a un campo eléctrico suficientemente elevado, influenciados principalmente por la presión, temperatura y humedad. Este efecto capaz de acelerar los electrones libres al nivel de energía necesario para causar ionización por impacto [1].

Normalmente el campo eléctrico vertical inducido en la superficie de la Tierra, cuando hay buen tiempo, es de aproximadamente, 120 V/m, pero este se eleva exponencialmente hasta valores de 15 a 20 kV/m [2], cuando hay tormentas y la nube está totalmente electrificada. Esto muestra una idea muy fugaz sobre la fuerza enorme y destructiva que poseen las tormentas eléctricas.

Ahora bien, se sabe que las tormentas tienen un alto poder destructivo, sin embargo, en Ecuador no se disponen de sensores de nivel cerámico, tal como nos indica en la referencia [2]. Por lo que se analizarán datos de la ocurrencia de rayos como son: Datos cerámicos de fuentes internacionales como el sensor satelital LIS, otro indicador de la ocurrencia de rayos son el número de muertes por esta causa.

El único mapa de nivel cerámico es uno que fue creado por INECEL hace más de 25 años, estos datos se encuentran desactualizados y comprometen áreas muy grandes con un solo valor cerámico, que sirve como referencia, pero no como un dato muy cercano a la realidad.

Es por esto, que este proyecto técnico busca lograr una actualización del nivel ceráunico, y proporcionar valores más cercanos a la realidad, utilizando el software Matlab se realiza la programación de una plataforma informática en donde el uso de comandos de repetición ayuda al análisis de todos los cientos de datos obtenidos del sensor satelital LIS (Lightning Imaging Sensor) de la NASA, se utilizaron estos datos ya que no existen bases digitales de nivel ceráunico a nivel nacional, por parte de organismos como el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) y la Secretaría del Ambiente del Municipio de Quito. Los datos manejados son aquellos que se encuentran dentro del área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito, especificada en las “Normas para sistemas de distribución, Parte A, Guía para diseño” de la EEQ, y en el Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Se busca hacer un promedio con los cuatro datos más cercanos al punto deseado y mostrar al usuario el nivel ceráunico y el nivel de densidad de descargas a tierra. Además, mediante el programa ArcGIS se elaboró el mapa isoceráunico y el mapa de densidad de descargas atmosféricas a tierra, utilizando herramientas de interpolación como IDW (Inverse Distance Weighting) en donde se estima de forma matemática (determinística) las zonas con una similar incidencia de rayos, creando así líneas iso que permitan generar el gráfico adecuado.

PROBLEMA

Durante varios años, se ha tenido una única fuente de consulta que indique algo respecto a descargas atmosféricas, en este caso es el mapa de nivel isoceráunico del Ecuador. Este mapa fue creado hace más de 25 años, pero, por las condiciones climáticas tan cambiantes, estaría muy desactualizado. Además, tiene una baja resolución, ya que compromete áreas muy grandes con un mismo valor isoceráunico. Esto ha causado que en la EEQ, casi no se utilice este mapa ya que no permite visualizar de forma exacta el nivel isoceráunico en un punto específico, por lo que se ha optado por recurrir a metodologías de conocimiento a posteriori, es decir basados en la experiencia del diseñador eléctrico, pero no de un fundamento científico o instrumento como es el mapa. Además, se hacen consideraciones subjetivas, de la cantidad de tormentas eléctricas que hay en cierto sector, se confunde un día de lluvia con un día de tormenta eléctrica, por ejemplo, si el diseñador cree que llueve mucho por el sitio donde se encuentra el proyecto a realizar, se refuerza la protección contra descargas atmosféricas, esto causa riesgos por mal dimensionamiento en la parte técnica, y una ineficiencia en la parte económica. Los proyectos que podrían estar siendo afectados por esto son varios, proyectos hechos por entidades públicas y privadas, sin que se haya expuesto una solución oportuna hasta ahora. En la investigación de la referencia [3], por mencionar un ejemplo, se hace una encuesta a los miembros del personal técnico de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi, en donde el 100% de miembros manifestó que no sabe entre que cantidades se encuentra la Provincia de Cotopaxi con respecto a los niveles isoceráunicos. Esto demuestra el desconocimiento en general que tienen incluso personas con preparación técnica de la importancia del nivel ceráunico, lo cual ha dificultado el desarrollo de más investigaciones sobre este tema, y la actualización del mapa isoceráunico durante todos estos años.

ANTECEDENTES

El origen del problema planteado, se da ya que el análisis de descargas atmosféricas ha sido un tema excluido de planes de monitoreo digital, por parte de la principal entidad encargada del clima en nuestro país, INAMHI y por otros secundarios como la Secretaría del Ambiente. Existen sensores en las estaciones meteorológicas de radiación solar, velocidad el viento, presión, temperatura, pluvial; pero, no de descargas atmosféricas, ya que son sensores especiales y costosos. Por esta razón, solo se monitorea las nubosidades para ver si hay pronóstico de lluvia, en páginas web, las páginas consultadas por INAMHI para pronosticar son: Tropical Tidbits, para ver la tasa promedio de precipitación (mm/hr); y Pivotal Weather para analizar la cantidad de energía que lleva una nube. La combinación de ambas, y el juicio de expertos dictamina o no si se espera lluvia, o lluvia con tormenta eléctrica, etc. Para informar a la población mediante redes sociales oficiales y medios de comunicación. Lo mencionado anteriormente es lo más cercano que se hace a un estudio de descargas atmosféricas, pero, no existe un registro real sobre tormentas eléctricas y descargas atmosféricas, ya que solo se hace un pronóstico, que puede suceder o no. Es importante la creación de bases de datos, con valores de la incidencia de descargas atmosféricas por zonas, como el nivel ceráunico o densidad de descargas atmosféricas a tierra, pero es algo que no se analiza ni se registra. Esto a lo largo del tiempo ha causado que no existan datos suficientes para investigar sobre descargas atmosféricas en Ecuador. Además de la falta de registros por parte de entidades públicas, tampoco han existido investigaciones que se enfoquen en actualizar los niveles isoceráunicos exclusivamente; en otras investigaciones como [3], solamente se analizan sistemas de apantallamiento para descargas atmosféricas pero no se ha buscado actualizar el mapa isoceráunico. Esto se debe también, a la inexistencia de sensores de descargas atmosféricas propios de nuestro país, por falta de recurso oportuno que sea destinado para este fin, adicionalmente, por esta misma razón, no hay una investigación constante de este fenómeno de la naturaleza como en otros países.

IMPORTANCIA

Al finalizar este proyecto técnico, se espera facilitar una fuente de información como es la plataforma informática e instrumentos como el mapa isoceraúnico y el mapa de densidad de descargas atmosféricas a tierra, que permitan determinar la cantidad de descargas atmosféricas que se esperan al año, en un punto específico. Para que un ingeniero, o una persona especializada, que se encuentre realizando un diseño de un proyecto, pueda tomar decisiones oportunas respecto a las protecciones contra descargas atmosféricas, es decir, reforzar o no, apantallamientos. Con esto se solucionan varios problemas de aspecto técnico y económico de los proyectos, al lograr un correcto dimensionamiento y coordinación de protecciones, siendo de utilidad tanto para CELEC EP (Corporación Eléctrica del Ecuador), con su unidad de negocio TRANSELECTRIC, a nivel de transmisión, y subtransmisión así como también para la EEQ (Empresa Eléctrica Quito), a nivel de distribución. De igual forma, puede ser de utilidad también para empresas privadas, que realicen obras civiles, ya que, en edificios, centros comerciales, o estructuras altas se debe considerar el nivel ceráunico para diseño. Adicionalmente, también puede ser de utilidad para universidades y población en general. Estos mapas y plataforma informática, permiten tomar medidas que eviten riesgos y asegurar las condiciones de seguridad de los sistemas eléctricos.

La referencia [2], propone la instalación de una serie de sensores de descargas atmosféricas en nuestro país, que permitan un constante monitoreo y registro. Además, junto con la referencia [3], recalcan la importancia de la actualización del mapa isoceraúnico del Ecuador, por cuestiones de tiempo no se realizó de todo el país, pero este proyecto técnico es un aporte significativo para la ciudad de Quito, y su respectivo cantón con el mismo nombre, además de otros distintos cantones como San Miguel de los Bancos, Pedro Vicente Maldonado, Puerto Quito, Rumiñahui, Mejía, Quijos, El Chaco y parte del cantón Archidona.

ALCANCE

Este proyecto técnico tiene como fin la creación de un mapa isoceraúnico detallado y la creación de un mapa de densidad de descargas atmosféricas a tierra (descargas/ km^2 - año), ambos mapas dentro del área de concesión de la EEQ. Se generará una aplicación hecha en Matlab que va a correr como ejecutable (.exe) para que toda persona tenga acceso a la aplicación y la pueda utilizar de una forma rápida y segura. En la aplicación, el usuario tiene que ingresar el dato de longitud y de latitud en coordenadas geográficas y obtendrá el dato del nivel ceraúnico, y densidad de descargas atmosféricas a tierra en ese punto exacto. Esto soluciona dos aspectos muy importantes para la Empresa Eléctrica Quito, tener mapas que muestren la incidencia de rayos de forma gráfica, con datos actualizados y georreferenciados. Además de una aplicación interactiva que muestre esta misma incidencia de rayos, en forma numérica, en un punto exacto georreferenciado que desee el usuario. Estos dos aspectos ayudan mucho en el diseño de proyectos eléctricos, como se detalló anteriormente. Ya que, el número de descargas atmosféricas por unidad de superficie y por año (descargas/ km^2 - año), ayuda a tomar consideraciones generales sobre apantallamiento, protección a personas contra el rayo y estructuras como edificios. Los datos fueron obtenidos de la NASA, y su sensor satelital LIS, en varias investigaciones publicadas como, por ejemplo: se ha utilizado esta base de datos para analizar las descargas atmosféricas.

DELIMITACIÓN

El actual proyecto técnico, tiene como delimitación la zona del área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ S.A). La Empresa Eléctrica Quito está principalmente en dos provincias que son; Pichincha y Napo. Los cantones a los que sirve la EEQ son: San Miguel de los Bancos, Pedro Vicente Maldonado, Puerto Quito, Rumiñahui, Mejía, Quijos, El Chaco y parte del cantón Archidona. Con ciertas zonas limítrofes con las provincias de Cotopaxi, Imbabura o Santo Domingo que no se encuentran bien definidas por la propia empresa, pero en general, entre las principales poblaciones que la EEQ S.A da servicio de energía eléctrica están:

En Napo: Cosanga, Baeza, El Chaco, Cuyuja, Papallacta, Quijos, Sarayacu, entre otros.

En Cotopaxi: San Juan de Pastocalle, San Bartolomé de Pastocalle, y, el Boliche.

En Santo Domingo: El Tesoro, San Vicente.

En Imbabura: Pueblo Unido, Naranjal, Santa Rosa de Naranjal, Villaflora Manduriacu, Santa Fe, entre otros.

En Pichincha: Machachi, El Chaupi, Aloag, Tambillo, Amaguaña, Pintag, Sangolquí, San Rafael, Alangasí, Conocoto, La Merced, Pifo, Tumbaco, Cumbayá, Nayón, Llano Chico, Puembo, Tababela, Yaruquí, El Quinche, Guayllabamba, Cusubamba, Nanegalito, Nanegal, Perucho, San José de Minas, Pacto, Pedro Vicente Maldonado, San Miguel De Los Bancos, Mindo, Nono, entre otros.

Podemos observar que la Empresa Eléctrica Quito no solo sirve al Distrito Metropolitano de Quito si no a varias provincias, y con esto, a varias poblaciones del Ecuador.

La Empresa Eléctrica Quito tiene un área de concesión de 15.155,49 km², por donde atraviesa la cordillera de los Andes, aunque también se encuentran varios valles, [4].

OBJETIVO GENERAL

- Implementar un mapa isoceráunico georreferenciado en base a la información de las estaciones meteorológicas disponibles dentro del área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito S.A., para el desarrollo de una aplicación de consulta acerca del nivel ceráunico de acuerdo a coordenadas geográficas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar y validar información de las estaciones meteorológicas que dispongan datos de descargas atmosféricas en el área de estudio.
- Implementar un algoritmo para la generación de curvas isoceráunicas.
- Crear una aplicación que permita obtener el nivel ceráunico de acuerdo a coordenadas de longitud y latitud.

FUNDAMENTO TEÓRICO

CAPÍTULO I

ZONA DE INVESTIGACIÓN

1. 1 Empresa Eléctrica Quito, (EEQ S.A).

1.1.1 Características generales

La EEQ es una de las más grandes empresas que suministran energía eléctrica del país, además de un referente para las demás ciudades del Ecuador, por tener las siguientes aportaciones al sistema eléctrico de potencia del Ecuador:

Generación: 219,4 GWh

5 centrales de generación hidroeléctrica.

1 central térmica.

Transmisión

y subtransmisión: 1.259 MVA.

40 subestaciones de distribución.

Aproximadamente 700 km en líneas de subtransmisión de 46 kV y 138 kV de transmisión.

Distribución: 2.679,93 MVA.

201 circuitos primarios.

39.724 transformadores de distribución.

8.630 km red primaria [M.V].

9.924,51 km red secundaria [B.V].

Estos valores cada vez se encuentran incrementándose por aumento de la demanda y son usados simplemente como referencia.

1.1.2 Formación de la empresa

1955: La anteriormente llamada Empresa Eléctrica Municipal pasa a ser oficialmente como hoy se la conoce, Empresa Eléctrica Quito S.A., la cual se registra como una compañía autónoma el día 29 de septiembre de 1955, En donde constan 3 accionistas principales, el Municipio de Quito, la Caja del Seguro y la Caja de Pensiones, que posteriormente se fusionarían para formar lo que hoy es el Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS). La duración convenida de esta alianza era de 50 años, para lograr levantar una empresa mercantil y anónima civil que sea reconocida comercial y socialmente en todo el país.

1972: El Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) compra el 2% de las acciones de la Empresa el día 18 de agosto de aquel año. Mientras que, el Municipio de Quito y el IESS siguen siendo los socios mayoritarios con 49% de las acciones cada uno.

1974: El día 7 de marzo de aquel año, INECEL se convirtió en socio mayoritario ya que compró las acciones que pertenecían al IESS, haciéndose así con el 51% de las acciones de la empresa.

1998: Cuando se extinguió INECEL, sus acciones de la empresa fueron transferidas al Fondo de Solidaridad, con el 56,99% de estas, un 10 de septiembre del año 1998.

2009: Al desaparecer el Fondo de Solidaridad, el paquete de acciones de este pasa a ser del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), ya que es una institución del Estado. Se vuelve principal accionista con un 56,992% del paquete accionario. Así mismo, la empresa empieza a operar como Empresa Pública cumpliendo la Disposición Transitoria Tercera del Mandato 15 y lo dispuesto en la Ley Orgánica de Empresas Públicas, publicada en el Registro Oficial N°. 48 de 10 de octubre de 2009.

2014: El capital social de la EEQ alcanza los USD 221'136.231, y el capital autorizado ascendió a USD 244'320.5962.

[4]



Figura 1. Línea histórica EEQ.

La empresa Eléctrica Quito ha brindado por varios años el servicio de energía eléctrica a los hogares de los quiteños. Y, además, de distintos poblados que se especificaron anteriormente. Los datos recabados de energía con 219,4 GWh cada vez siguen aumentando, junto con sus centrales de generación, sus redes de subtransmisión y distribución. Su trayectoria, responsabilidad con el consumidor, buena infraestructura, la hacen una empresa consolidada y creciente.

1.2 Geografía

La Empresa Eléctrica Quito tiene un área de concesión de 15.155,49 km², en una parte, la atraviesa la cordillera de los Andes, otras son zonas más llanas y boscosas. [4]

1.3 Clima

El clima se analizará a nivel de la ciudad de Quito, solo como referencia, ya que es en donde existe la mayor densidad de población dentro del área de concesión.

El clima en Quito, según Weather Spark [5], la cual es una herramienta online que utiliza los datos retrospectivos de la NASA, mediante Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) con datos confiables a partir de 1980 de Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), indica lo siguiente:

En Quito, la temporada de lluvia es fresca y nublada y la temporada seca es cómoda y parcialmente nublada. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 9 °C a 19 °C y rara vez baja a menos de 7 °C o sube a más de 21 °C.

Lo cual convierte a Quito en una ciudad con un clima normalmente templado y cómodo para la mayoría de personas. Si bien es cierto en temperatura es algo regular como se puede observar en los datos, en precipitación es un poco más cambiante. La precipitación se mide en días mojados. Un día mojado es considerado así, si por lo menos, cae 1 milímetro de líquido durante el día.

La temporada más mojada dura 5,5 meses, de 10 de diciembre a 27 de mayo, con una probabilidad de más del 44 % de que cierto día será un día mojado. La probabilidad máxima de un día mojado es del 76 % el 18 de abril. Esta temporada se la conoce normalmente en Quito como invierno, aunque el término correcto es temporada mojada, ya que por al estar en la mitad del mundo no disponemos de las estaciones del año en sí.

La temporada más seca dura 6,5 meses, del 27 de mayo al 10 de diciembre. La probabilidad mínima de un día mojado es del 11 % el 31 de julio. De igual forma, esta temporada se la conoce normalmente como verano, pero el término correcto, para Quito, es: temporada seca.

Entre los días mojados, se distingue entre los que tienen solamente lluvia, solamente granizo o una combinación de las dos. En base a esta categorización, el tipo más común de precipitación durante el año es solo lluvia, con una probabilidad máxima del 76 % el 18 de abril, [5].

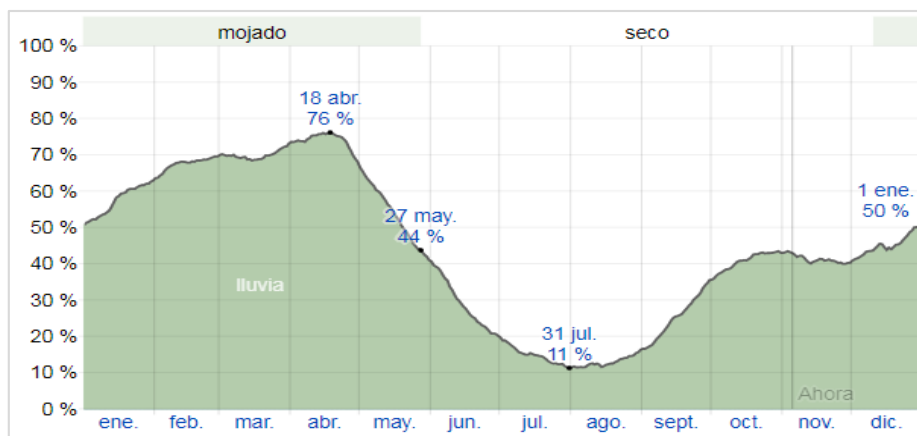


Figura 2. Probabilidad diaria de precipitación en Quito. Fuente: [12]

El porcentaje de días en los que se observan diferentes tipos de precipitación, excluidas las cantidades ínfimas: solo lluvia, solo granizo, mezcla (llovió y granizó el mismo día).

Como se observa en la **Figura 2**, la temporada mojada dura aproximadamente 5.5 meses de todo el año, es decir, un poco menos de la mitad, sin embargo, esto no quiere decir que en la temporada seca no llueva, pero, llueve menos. Entonces, la ciudad de Quito es una ciudad propensa a las lluvias, aumentando la probabilidad de precipitación desde diciembre hasta el pico de lluvias en abril.

1.4 Estaciones meteorológicas dentro de la zona de investigación.

Ahora, las estaciones meteorológicas del INAMHI de las cuáles se va a recabar la información que se encuentran dentro de esta área de concesión son:

Estaciones meteorológicas INAMHI
M0055
M0024
M0002
M0188
M5126
M5125
M1124
M0117

Estaciones meteorológicas INAMHI
M1274
M1274
M0003
M1273
M1274
M0003
M5150
M1273

Estaciones meteorológicas INAMHI
En los límites:
M1219
M5148
M0001

Estaciones meteorológicas INAMHI
M1094
M5124
M5149

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del INAMHI dentro del área de concesión de la EEQ.

Las estaciones meteorológicas de la Secretaría del Ambiente del Municipio de Quito son:

Estaciones meteorológicas Secretaría del Ambiente
M5010
M5036
M5037
M5041
M5150
M5041
M5039
M5025

Estaciones meteorológicas Secretaría del Ambiente
M5042
M5035
M5010
M5039
M5038
M5040
M5038

Tabla 2. Estaciones meteorológicas de la Secretaría del Ambiente dentro del área de concesión de la EEQ.

En donde, las estaciones meteorológicas indican las siguientes variables climáticas: Humedad relativa del aire (%), Precipitación (mm), Presión Atmosférica (hPa), Radiación Solar Global (W/m²), Temperatura del Aire (°C), Viento Dirección (°), Viento Velocidad (m/s). Dependiendo de la estación meteorológica se dispone o no de ciertas variables climáticas. Hay, además, estaciones que se tienen que recabar los datos manualmente, y otras que se las denomina estaciones automáticas en donde se parametriza mediante programación la variable deseada. Los datos desplegados finalmente, son datos promedio de algunas mediciones, tal como indica la referencia [6].

Los datos de las estaciones meteorológicas son proporcionados en el INAMHI mediante “Atención al usuario”, en donde se pide oficios institucionales en donde justifique una investigación, y poder entregarlos. La Secretaría del Ambiente del Municipio de Quito, también posee un área exclusiva para atender estos requerimientos.

Al solicitar los datos necesarios para este proyecto técnico, ambos organismos públicos informaron que no poseían datos de descargas atmosféricas. Aunque, indicaron que otras variables climáticas como los índices de precipitación o pluviales, pudiesen servir como referencia. Es por esta razón, que finalmente, no se utilizaron los datos de estas estaciones meteorológicas, y hubo que buscar en otras fuentes, lo cual se detallará posteriormente.

CAPÍTULO II

DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 Origen de las descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas se originan por varios factores que dependen del clima, que es variable, y de la topología que es constante. Además de la estación del año, entre otras variables detalladas a continuación.

2.1.1 Formación de la descarga atmosférica.

La descarga atmosférica es un fenómeno de la naturaleza que se presenta en forma de plasma, y dura unos instantes. Para su estudio, se lo clasifica en un apartado llamado sobrevoltajes, los cuáles se clasifican por su tiempo de duración y una descarga atmosférica puede ser una sobretensión transitoria de frente lento o de frente rápido dependiendo de las condiciones del fenómeno. Además, existen dos tipos de sobrevoltajes, interno y externo, una descarga atmosférica es un tipo de sobrevoltaje externo, mientras que, los sobrevoltajes de tipo interno son aquellos que se presentan en las instalaciones por operaciones, fallas u otros motivos propios de la red, que no son temas que se abordarán en esta investigación, [7].

2.1.2 Teorías de formación de descargas atmosféricas.

Existen algunas teorías que explican cómo y por qué surgen las descargas atmosféricas y son:

- a) Teoría de Simpson
- b) Teoría de Elster y Geitel
- c) Teoría de Wilson
- d) Teoría de los cristales de hielo
- e) Teoría de Townsend para descargas eléctricas en gases

a) Teoría de Simpson. Esta teoría nos indica que la formación de cargas eléctricas que permitan la posterior aparición de un rayo, se debe principalmente a que cuando hay una lluvia y las gotas están cayendo al suelo, estas se van dividiendo en su camino, ya sea por corrientes de aire, vapor húmedo, y bajo condiciones atmosféricas propicias. Estas gotas cada

vez se hacen más pequeñas, lo que llega a provocar el desprendimiento de iones negativos que se dispersan en la atmósfera y al mismo tiempo son transportados por las corrientes de aire hacia la parte inferior de la nube, por lo que en este trayecto de movimiento de cargas se produce una carga inductiva que puede o no generar una descarga eléctrica, [7].

b) Teoría de Elster y Geitel. En esta teoría se realizaron estudios sobre una gota grande de lluvia y el campo eléctrico. El campo eléctrico en la superficie está alrededor de unos 100 V/m en condiciones normales. Lo que hace que la gota se polarice en la parte superior por una carga negativa y en la parte inferior por una positiva. Mientras cae la gota hacia la superficie es muy probable que choque con otras gotas, la primera gota en este choque sufriría un aumento en su carga positiva al chocar con la gota de abajo, mientras que, la gota de abajo sufriría un aumento de carga negativa en la parte superior al chocar con la otra, y de esta forma la nube se va cargando cada vez más, de una forma negativa en la parte superior y positiva en la parte inferior, en donde llega a un punto de saturación el cuál produce la descarga eléctrica, [7].

c) Teoría de Wilson. La teoría de Wilson se basa principalmente en iones, que se encuentran en todas partes alrededor de la atmósfera terrestre, nos da una estimación en donde se dice que en el aire existen alrededor de 1000 iones positivos y 800 negativos por cada cm^3 . Por efecto de las corrientes de aire ascendentes se ioniza la nube, es decir se carga eléctricamente, en donde, los iones negativos viajan hacia la parte inferior de la nube cargándola negativamente y los iones positivos se dirigen hacia tierra para cargarla positivamente. Mientras llueve, las gotas de agua chocan con los iones presentes en el aire, de esta forma ionizando la atmósfera y aún más la nube, incluso por el rompimiento de gotas en su camino al suelo, facilitando así la formación de canales para descargar hacia tierra o hacia la nube, [7].

d) Teoría de los cristales de hielo. Esta teoría no es en sí de un solo autor, lo único que se explica aquí es la importancia de los cristales de hielo para la formación de rayos. Lo que se trata de explicar es el por qué surgen descargas eléctricas entre nubes cuando no están todavía con lluvia. En donde, Simpson y Robinson explican que, en ciertas nubes, en la parte superior

de ellas se llega a una temperatura alrededor de los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, en donde, se forman cristales de hielo, estos cristales de hielo comienzan a chocar entre sí por efecto del aire, lo que hace que el aire adquiera carga positiva y los cristales de hielo queden cargados negativamente, lo que luego de una saturación de cargas puede generar una descarga entre nubes. Elster y Greitel creen que existe una separación de cargas eléctricas debido a la fricción entre el vapor de agua que se genera en la parte de debajo de las nubes y los cristales de hielo de la parte superior, pudiendo presentar o no descargas eléctricas en el interior de la nube, [7].

e) Teoría de Townsend para descargas eléctricas en gases. La teoría de Townsend es de gran ayuda para explicar la ionización de los gases en diferentes condiciones, influenciados principalmente por la presión, temperatura y humedad. Townsend explicó principalmente la ionización por colisión. Rápidamente podemos decir que esta se da cuando un electrón que sale del cátodo es acelerado por el campo eléctrico, si la energía que este electrón gana en el “viaje” es mayor que la energía de ionización e impacta a una molécula puede desprender un electrón de dicha molécula, dándose lugar a la ionización. Con esto, debemos decir que él, hizo una serie de experimentos científicos para determinar una ecuación (un modelo matemático) que describa el comportamiento de los electrones antes de suceder una descarga, [1].

Después de observar las distintas teorías sobre la formación de rayos, podemos decir que tienen algunas cosas en común. En todas las teorías se habla sobre la colisión, unos a gran escala como colisión de gotas, otras a pequeña escala como la colisión de partículas cargadas, pero es un denominador común, por lo que podemos decir que para la formación de rayos deben existir colisiones en donde se desprenda cierta energía o como Townsend lo llama, se ionice una partícula. Deben existir condiciones propicias de humedad, temperatura y presión además que también depende de las corrientes de viento, el viento depende de la topología de la zona entonces las descargas eléctricas también van a depender de esto. Las combinaciones de todos estos elementos generan zonas en donde la incidencia de rayos aumenta. Cómo, por ejemplo, se puede observar en la **Figura 3**, correspondiente a uno de los “hot-spots” o puntos calientes, de rayos en nuestro planeta, entre Colombia y Venezuela. Las

zonas más rojizas, son zonas en donde existe mayor incidencia de rayos, en la figura consta como una leyenda de densidad de descargas a tierra, [8].

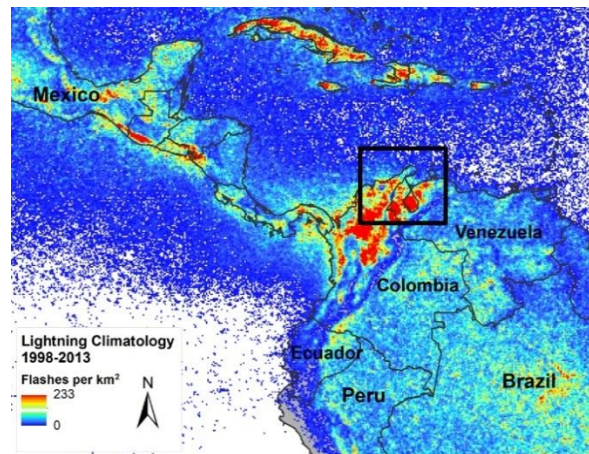


Figura 3. Puntos calientes o “hot-spots” de descargas atmosféricas del planeta Tierra. Fuente: [14]

Se debe aclarar que para que exista una descarga atmosférica se debe superar los 30 kV/cm de la rigidez dieléctrica del aire, y esto se consigue bajo las condiciones geográficas, y atmosféricas anteriormente mencionadas, aunque la aparición o no del rayo es cuestión de probabilidad. [7]

2.2 Clasificación de los rayos.

Existen dos tipos básicos de descargas:

- Descargas nube-tierra: Este tipo de descargas son conocidas también como (N-T) y puede variar su polaridad dependiendo de si se saturó primero las cargas positivas o las negativas, aunque existe una mayor incidencia de descargas eléctricas con carga negativa. Además de su polaridad, las descargas nube-tierra pueden ser ascendentes o descendentes.

Las descargas descendentes, son aquellas iniciadas por un precursor descendente desde la nube a tierra. Estas principalmente aparecen en terrenos llanos y hacia estructuras poco elevadas.

Las descargas ascendentes, son aquellas iniciadas por un precursor ascendente desde una estructura en tierra hacia la nube. Se debe aclarar que las descargas ascendentes aparecen

más en estructuras bastante elevadas o expuestas. Existe una alta probabilidad de impacto de un rayo directamente a una estructura cuando esta es más alta.

Descargas entre nubes: Conocidas también como nube - nube (N-N), se da por la diferencia de cargas entre nubes, cuando llegan a una saturación, se produce una avalancha de electrones, [9].

2.3 Afectaciones por descargas atmosféricas.

Las descargas atmosféricas en la actualidad se han convertido en un riesgo constante para los equipos eléctricos electrónicos, y desde la antigüedad, un riesgo para los seres vivos. Continuamente se están estudiando las descargas atmosféricas ya que tienen un poder muy destructivo.

Existen distintos organismos, asociaciones y comisiones los cuáles se encargan de investigar y divulgar en normas y estándares las conclusiones de sus investigaciones. Se colocan una serie de recomendaciones para un diseñador eléctrico, es decir para profesionales en este campo, así como también para la población en general. Como principales podemos indicar los siguientes:

Organismos internacionales de interés del sector eléctrico – electrónico
International Electrotechnical Commission (IEC). Sus normas rigen en Europa aunque es un referente global.
Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Sus estándares rigen sobre todo en Estados Unidos y en toda América.
The National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Sus estándares rigen en Estados Unidos aunque en algunos países de América los replican.
National Fire Protection Association (NFPA). Sus estándares rigen en Estados Unidos aunque en algunos países de América los replican.

Tabla 3. Organismos internacionales encargados de investigar y divulgar normas, estándares.

2.3.1 Norma IEC 62305.

La norma guía para protecciones que recomienda este proyecto es la Norma IEC 62305, que proporciona los principios generales a seguir para la protección contra el rayo de:

- a) Las estructuras, incluyendo sus instalaciones y su contenido, así como a las personas.
- b) Los servicios conectados a una estructura.

Esta norma se divide en cinco apartados principales que son:

1. IEC 62305-1 *Protección contra el rayo. Parte 1: Principios generales.*
2. IEC 62305-2 *Protección contra el rayo. Parte 2: Evaluación del riesgo.*
3. IEC 62305-3 *Protección contra el rayo. Parte 3: Daño físico a estructuras y riesgo humano.*
4. IEC 62305-4 *Protección contra el rayo. Parte 4: Sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.*
5. IEC 62305-5 *Protección contra el rayo. Parte 5: Servicios.*

[10]

Esta al ser una norma internacional, es muy completa, cada una de sus partes tiene lo más relevante en relación a la protección contra el rayo.

Las descargas atmosféricas pueden causar varios daños, el más grave en sí, es la pérdida de vida humana. Y otros daños materiales un poco menos graves como son, causar la pérdida de servicio público, pérdida de patrimonio cultural, pérdida de valor económico. Como ilustración, se puede observar la **Figura 4**, que es un resumen general sobre las pérdidas que podría ocasionar una descarga atmosférica.



1) Solamente para las estructuras.

2) Solamente para los hospitales o estructuras análogas en las que un fallo de los sistemas internos pone en peligro la vida humana inmediatamente.

3) Solamente en el caso de pérdidas de animales.

Figura 4. Tipos de pérdidas causadas por las descargas atmosféricas y riesgos asociados a los distintos tipos de daño.

2.3.2 Sobrevoltajes causados por las descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas causan problemas por sobrevoltajes inducidos, el sobrevoltaje causado por estas, es el más frecuente en instalaciones. Los sobrevoltajes externos, ocasionan interrupciones en el servicio de energía eléctrica, además de diversos daños materiales, dependiendo del tipo, y son:

- a) **Sobrevoltaje externo por carga estática.-** Al existir nubes con movimiento por acción del viento, que viajan alrededor de 40 km/h, se induce un voltaje por carga estática hacia estructuras y sobre todo hacia líneas de transmisión. Un medio de descarga para este fenómeno que no necesita de activación alguna son los hilos de guarda en las L/T y en las subestaciones a lo largo del SEP, [7].
- b) **Sobrevoltaje externo por descarga indirecta.-** Cuando un rayo cae cerca de una instalación, se produce un efecto de inducción electrostática y electromagnética, lo que hace que produzcan sobrevoltajes de 100 y hasta 200 kV con corrientes de 25 a 75 kA. Este tipo de descargas son las que más afectan a mediano y bajo voltaje, es decir más comúnmente a la etapa de subtransmisión y distribución del SEP, [7].
- c) **Sobrevoltaje externo por descarga directa.-** Cuando cae un rayo directamente en una instalación puede ocasionar daños graves, obligando a realizar un esfuerzo dinámico y térmico. Y cuando cae sobre una L/T de forma directa, la descarga atmosférica provoca ondas que viajan a la velocidad de la luz viajando en ambas direcciones de donde fue el impacto, [7].

Una descarga atmosférica tiene unos valores pico de corrientes de 50 a 200 kA, lo que hace que, si hay un impacto directo, por unos instantes el poder de daño sea muy grande, [10].

2.3.3 Estándares de seguridad contra descargas atmosféricas

Sea cual sea la forma en la que se produzca el sobrevoltaje de tipo externo, esto es un peligro constante en líneas de transmisión y sus estructuras conectadas. Además, el riesgo persiste en subestaciones y a lo largo de todo el sistema eléctrico de potencia. Por esta razón, existen algunos estándares que precautelan la seguridad de equipos y personas frente a las descargas atmosféricas a lo largo del SEP, como ejemplos podemos nombrar:

1. IEEE Std. 998-2012 “Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations”. Es un estándar utilizado para subestaciones.

2. IEEE 1410-2010 “Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”. Es un estándar utilizado a nivel de distribución.
3. IEEE 1243-1997 “Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines”. Es un estándar utilizado a nivel de transmisión y subtransmisión.

Las descargas atmosféricas han sido un tema de investigación por varios años, controlando los riesgos que implica, se pueden evitar accidentes. Tanto las normas de la IEC, como es la IEC 62305, así como los estándares de la IEEE anteriormente mencionados, buscan compartir con las personas una serie de recomendaciones para atenuar el impacto negativo que pudiesen generar las descargas atmosféricas.

2.3.4 Pérdida de vida humana por descargas atmosféricas

Dentro de los daños que implican las descargas atmosféricas, está la pérdida de vida humana, este tipo de muertes, se dan cuando hay tormenta eléctrica y han aumentado en los últimos años. La página Desinventar que es una fuente gratuita y abierta de información que mantiene la Naciones Unidas para la reducción de riesgos y desastres, en inglés: United Nations Office for the Disaster Risk Reduction (UNDRR), indica que las provincias con más muertes a causa de tormentas eléctricas son: Pichincha, con 3 fallecidos y 16 heridos; Loja, con 5 fallecidos y 1 herido. Estos datos son registros desde el año 1970 al 2018, [11].

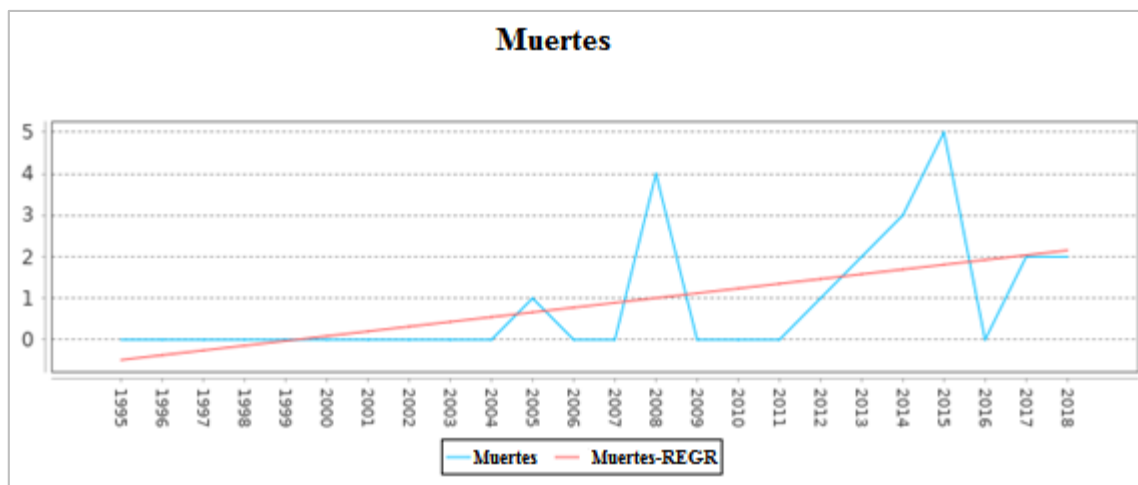


Figura 5. Muertes en Ecuador a causa de tormenta eléctrica. Fuente: [16]

Como se puede observar en la **Figura 5**, en años anteriores a 2004 no se tenían registros sobre muerte a causa de tormenta eléctrica. El mayor número de fallecidos por esta causa fue en el año de 2015 con 5 personas fallecidas. Cabe recalcar, que estos datos no tienen una certeza del 100%, es decir, son datos referenciales ya que pueden existir más personas fallecidas o heridas por esta causa que no se encuentran registrados en esta base de datos.

2.3.5 Daños materiales por descargas atmosféricas

Los daños materiales más comunes a elementos del sistema eléctrico que pueden generar las descargas atmosféricas sin entrar en detalles son: Deformación de los tableros, dañando las barras. Deformación o explosión de aisladores soporte en líneas de transmisión, subtransmisión y distribución, dependiendo de su rigidez dieléctrica. Daño de equipos como transformadores, transformadores de medición, (TP y TC) y distintos elementos dentro de una subestación. Es por esto que se debe aplicar correctamente los sistemas de protección contra el rayo, SPCR, y consideraciones del nivel de protección contra el rayo, NPR, para minimizar la probabilidad de daño material, no se ahondará en este tema, ya que no es motivo de investigación de este proyecto. Los daños materiales son causados por la corriente alta del rayo que genera un gran esfuerzo dinámico, sometiendo los componentes a fuerzas de atracción y repulsión, por acción de los campos eléctrico y magnético. Su gran energía en forma de calor, alcanza hasta 8350°C, [7].

CAPÍTULO III

PROTECCIONES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Se tiene que tener en claro que las descargas atmosféricas no se pueden evitar, es decir hasta la actualidad no hay un equipo o un método que impida que caigan rayos en ciertas zonas o sobre equipos. Por esta razón, más que impedir que caiga una descarga, lo que se hace es protegerse contra ella, dependiendo de lo que se quiera proteger existen varios métodos, instrumentos que en algunos casos atenúan los efectos adversos del impacto del rayo, otros directamente descargan la corriente del rayo a tierra. Los instrumentos que protegen contra descargas, para que cumplan con su cometido, tienen que tener un plan de fondo, llamado coordinación de protecciones, lo cual involucra cálculos y un conocimiento más profundo sobre las descargas eléctricas y por ende, sobre-voltajes.

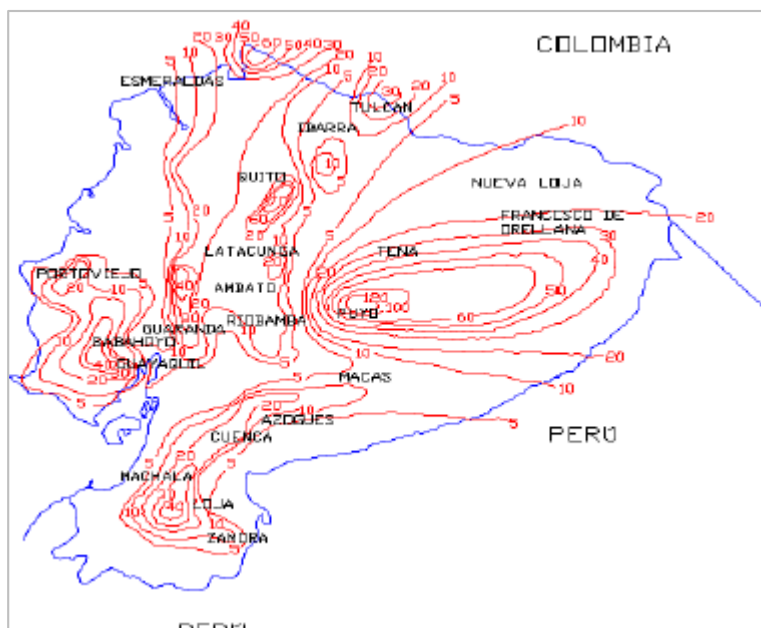
3.1 Planeación contra descargas atmosféricas.

3.1.1 Mapa isoceraúnico.

Es importante aclarar que las descargas atmosféricas tienen comportamiento probabilístico, que dependen de distintos factores como se ha visto anteriormente, de la humedad, temperatura, presión y hasta topología por los vientos, [12].

Este comportamiento probabilístico se resume en el nivel ceráunico, que es el número anual de días con tormenta eléctrica. Otra referencia de comparación muy importante, es el número de descargas por km^2 por año, o también llamada densidad de rayos-tierra (DRT), [7].

Generalmente, se pueden ver estos niveles probabilísticos plasmados en mapas por zonas, llamados niveles isoceraúnicos, llamados así por el prefijo “iso” que es un prefijo de origen griego que indica “igual”. La separación por zonas con un mismo nivel ceráunico hace que se llamen mapas isoceraúnicos.



En la **Figura 6**, podemos observar el mapa de Ecuador con sus niveles isoceraúnicos, este mapa fue proporcionado por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación, [3] y por la referencia [2], la cual proporcionó este mapa con más color. Estos valores ceraúnicos bien podrían estar desactualizados ya que los valores de tormenta varían año a año por distintos factores. El mapa isoceraúnico se lo tiene que tomar en cuenta en la planeación o planificación de una obra, puede ser a nivel del SEP, como trazado de líneas de transmisión, subestaciones, líneas de distribución; así como también de proyectos civiles de bajo voltaje como la construcción de edificios, estadios, puentes, casas, etc. De esta manera junto con las protecciones físicas SPCR se lograría un apantallamiento correcto técnicamente y seguro.

3.1.2 Mapas satelitales

Además del mapa isoceraúnico, se tienen mapas satelitales de distintas fuentes como:

- Weather Services International (WSI), GLN.-** La GLN (Global Lightning Network), es una asociación de la WSI son un sistema integrado de localización y detección de descargas atmosféricas. En donde para el avance en los esfuerzos de detección de

rayos se han instalado más de 150 sensores GLN, que tienen una detección de antena de aproximadamente 400 km (base-línea). Colocados estratégicamente en diversos sitios con “host” internacional. La red puede detectar descargas (N-T) y (N-N) con una eficiencia de 95% y 10% respectivamente, [12]. Web: (<https://www.unidata.ucar.edu/data/index.html#lightning>)

- **World Wide Lightning Location Network.-** WWLLN también es parte de la GLN (Global Lightning Network), en donde tienen receptores de muy baja frecuencia, operado por la Universidad de Washington, Estados Unidos, en colaboración con varios laboratorios de universidades y del gobierno. Una antena de campo eléctrico o magnético, un receptor GPS y un sistema de procesamiento conectado a internet son necesarios para localizar y detectar la posición y la hora que se genera un rayo en cualquier parte de la Tierra, usando la técnica del tiempo de llegada. En el 2003, solo funcionaban 10 sensores en todo el mundo, pero para el año 2013 los sensores aumentaron a más de 70. Los tiempos de llegada grupal se transmiten a un sistema central de procesamiento en donde se puede determinar la localización de los rayos en tiempo real. La eficiencia de la red sigue en aumento, desde 1.7% en 2003 hasta 11% en 2013 y sigue mejorando, [12]. Web: (<https://wwlln.net/>)
- **Lightning imaging sensor (LIS).-** LIS es un sistema de detección de descargas eléctricas “space-based” es decir, que se encuentra como un satélite en el espacio a bordo de la “Tropical Rainfall Measuring Mission”, la misión de medición de lluvia de los trópicos, para detectar la distribución y variación de las descargas atmosféricas (N-T) y (N-N). Este sistema de detección se va moviendo por la órbita con una resolución temporal de 2 milisegundos y una resolución espacial de 4 a 7 km. Además, 90 capturas instantáneas de todos los tipos de rayos son provistas por los satélites polares con un campo de visión de (600x600) km. La resolución y el rango no siempre son constantes, ya que dependen de la órbita y la altitud del sensor. La eficiencia de LIS es variable a lo largo del día, con un máximo del 90%. Este sensor hace una malla por cada 0.50 de latitud y 0.50 de longitud, en donde los datos son

grabados por el “Global Hydrology Resource Centre” (GHRC), [12]. Web: (<https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/lightning-research.html>)

Estos mapas son de gran utilidad, incluso algunos como el WWLLN son en tiempo real. Como ejemplo de la utilidad de estos mapas satelitales, se va a realizar una comparación actual del año 2018 y 2019 (hasta noviembre). Hay varias bases de datos de estos mapas, en la más actual de LIS, que solo muestra gráficamente las descargas y un conteo de rayos, como se puede observar la **Figura 7**, las descargas reales sucedidas en un periodo de tiempo que se puede elegir, si se quiere un análisis de día (06:00 – 18:00) h. o noche (18:00 – 06:00) h.

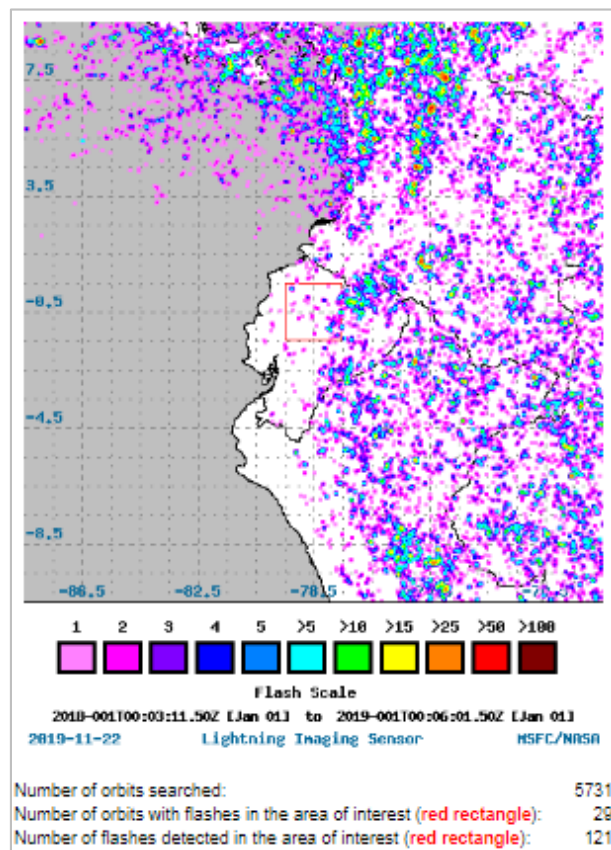


Figura 7. Descargas totales desde el 01 de enero 2018 al 31 de diciembre 2018, día y noche. Fuente: [18]

De igual forma, en la Figura 8, se puede observar un rectángulo rojo, este rectángulo representa aproximadamente el área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito, donde existieron 121 descargas eléctricas, a lo largo del 2018. En el periodo tanto en el día como en la noche, [13]. Y en la leyenda de colores indica la densidad de las descargas atmosféricas por zona.

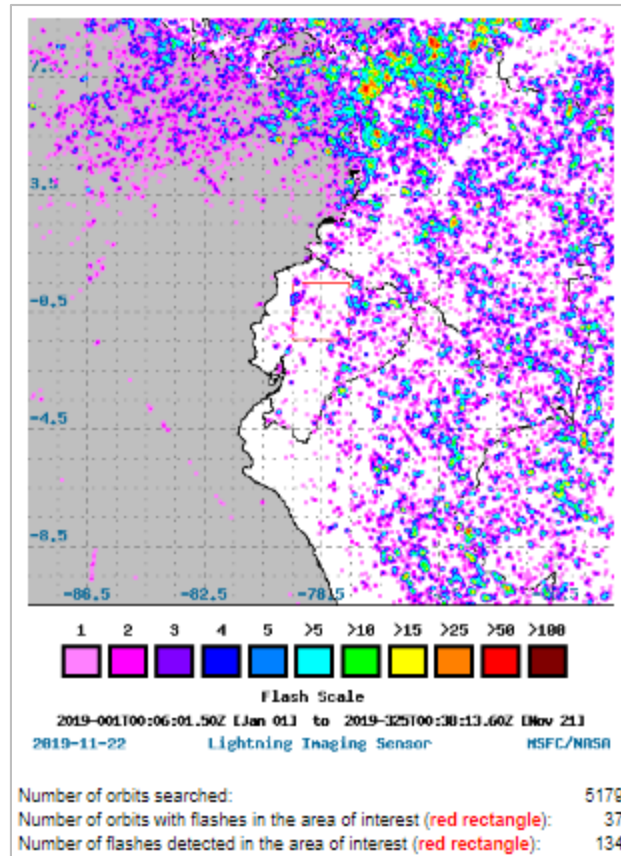


Figura 8. Descargas totales desde el 01 de Enero 2019 al 21 de Noviembre 2019, día y noche. Fuente: [18]

En lo que va del año 2019, (hasta noviembre de 2019) que se hace este documento, se puede observar que ha aumentado un poco la incidencia de rayos en el área de concesión de la EEQ. El sensor nos indica que ha habido 134 descargas atmosféricas, y tal como el anterior año con una mayor incidencia hacia el oriente. Como se puede observar, este tipo de mapas satelitales son muy útiles al momento de investigar sobre descargas atmosféricas, se tiene que considerar cuál es la mejor base de datos que se ajusta a la investigación de acuerdo a las especificaciones de cada página y la forma de descarga de los datos.

Después de analizar la **Figura 7** y **Figura 8**, se puede indicar que: las descargas atmosféricas son de tipo probabilístico y nunca van a ser las mismas de un año a otro, existen variaciones. Pero, vemos que mantiene una tendencia parecida al del año anterior, y muy posiblemente al del anterior a ese, es decir, mientras no cambien las condiciones como temperatura, humedad,

presión, topología, corrientes de viento, la tendencia va a seguir manteniéndose a lo largo de los años. Pero el problema es que en la actualidad sí hay muchos cambios en el ambiente y en los comportamientos del clima de acuerdo a las fechas del año, parece existir una predisposición a variar e irse desplazando las estaciones, por ejemplo, según científicos de la School of Art & Design y el Instituto de Cambio Climático de la ANU (Australian National University), Australia se quedará sin invierno para el año 2050. ([sinhttps://www.milenio.com/ciencia-y-salud/calentamiento-global-dejara-australia-invierno-2050](https://www.milenio.com/ciencia-y-salud/calentamiento-global-dejara-australia-invierno-2050)), con esto se quiere indicar que, el cambio climático es una realidad, y por esta razón, la incidencia de rayos en el planeta, podría ir variando significativamente con el pasar de los años, si se analiza de un año a otro tal vez no cambie mucho, pero si se analiza en mayores periodos de tiempo el cambio puede ser más drástico.

Es decir, la incidencia de rayos en un sector depende de varios factores y no es constante, por lo cual es bueno actualizar periódicamente estos mapas. Como planeación estos mapas satelitales e isoceráunico, ayudan a lograr un buen sistema de protección.

3.2 Sistemas de protecciones

La mejor forma de evitar las descargas es con un buen sistema de protecciones ya que pueden caer, o no, descargas atmosféricas directas en el sitio a proteger. Las descargas atmosféricas son algo que no se puede controlar porque es un fenómeno de la naturaleza, pero sí se pueden evitar, si se colocan adecuados sistemas o medidas de protección (SPCR).

Un sistema de protección es el conjunto de componentes y procesos que tiene como finalidad garantizar el suministro de energía eléctrica, evita fallas y disminuye los efectos de estas, también evita accidentes, [14].

Las formas generales de protección de sistemas de potencia son:

1. Fusibles
2. Apartarrayos
3. Hilos de guarda
4. Aislamientos

5. Ventilación
6. Sistemas de tierra
7. Protección física
8. Protección por relés

En el punto 2, se encuentran incluidos los pararrayos. Y en el 3, están incluidos las puntas franklin o aquí llamados mástiles, [14].

Como se observó en las formas generales de protección de sistemas de potencia existen varios sistemas aplicables para protección contra rayos. También existen otras formas de protección que no son contra descargas atmosféricas, como, por ejemplo: en transformadores de potencia, la ventilación y protección física, que no se los referirá en este escrito del proyecto.

Las formas de protección contra descargas atmosféricas son:

3.2.1 Fusibles

Los fusibles son aparatos operados térmicamente, cuando existe una corriente muy alta que pasa a través de ellos, quema un hilo conductor sensible dentro, cumpliendo así la función de interrupción, son especialmente usados en bajos voltajes y altas corrientes, no son ajustables ni tan exactos, además no son reusables, si un fusible cumplió con su función hay que reemplazarlo por completo con uno nuevo, [15].

Cabe recalcar, que los “breackers” generalmente de caja moldeada para tableros, son conocidos como aparatos de acción directa, aunque estos sirvan para la protección de sobrecorrientes para aparatos y circuitos locales dentro de una instalación, en bajo voltaje, pero no sirven para despejar la corriente generada por un rayo. Es por esto, que no se le toma en cuenta dentro de este apartado.

3.2.2 Apartarrayos

Un apartarrayos es un dispositivo que actúa como aislador en presencia de ondas de voltaje que están debajo de su nivel de operación; pero cuando las ondas de voltaje sobrepasan su nivel de operación, lo que hace es limitar el valor del sobrevoltaje y la corriente en duración y amplitud, de acuerdo a su curva de descarga. Se encuentra conectado entre línea y tierra, [7]. Cumple con las siguientes funciones específicas:

- Limita sobrevoltajes entre sus terminales.
- Ayuda a que la corriente del rayo se descargue a tierra por su baja impedancia.
- Después de su activación, este puede restablecerse solo; es decir, es auto-operado.

Se tienen que considerar varios aspectos antes de la selección del apartarrayos óptimo, como la clase de apartarrayos, voltaje de operación, rango de frecuencias, corriente mínima y máxima de interrupción. Estos no son temas en los que ahondará esta investigación.

3.2.3 Pararrayos

Es un dispositivo que sirve como protección ante sobrevoltajes de tipo externo como descargas atmosféricas, y sobrevoltajes de tipo interno como la operación de interruptores. Su función principal es descargar estos sobrevoltajes a tierra. Si hay un grupo de pararrayos, como generalmente hay uno por fase, estos se cortocircuitan en su parte inferior haciendo un puente a tierra, [15].

Existe una serie de procedimientos para la selección y colocación de pararrayos, ya que existen de distintos tipos y capacidades; por ejemplo: pararrayos tipo resistencia no lineal, pararrayos tipo expulsión, descargadores. Estos no son temas en los que ahondará esta investigación, [3].

3.2.4 Puntas Franklin

También son conocidos como mástiles, son un sistema de protección para mitigar los riesgos y efectos negativos de las descargas atmosféricas. Lo que hace en sí es aprovechar la

ionización del medio, proporcionando una alta conductividad, además de su altura, lo que hace más probable que un rayo caiga sobre la punta y se descargue a tierra.

Existen de distintos tipos y materiales, como, por ejemplo: punta captadora de cobre, bronce o acero inoxidable, de punta roscada, punta ligera, punta para cuña, multipunta, punta tipo esfera, punto de descarga. Varias empresas venden este tipo de puntas franklin, ofreciendo una gran variedad.

Algo que tenemos que tener en consideración al momento de diseño, es la altura de la estructura que se va a proteger y dependiendo de esto, además del nivel ceraúnico, se deberá elegir la forma de la punta, material, etc. Pero no basta con simplemente observar. Un análisis matemático tiene que ser tomado en cuenta para este propósito. En la referencia [16], se indica que para un análisis de puntas Franklin se debe tener en cuenta tres consideraciones:

- Estudio de parámetros de la condición de inicio de Streamer ascendente.
- Aumento virtual en la altura de la varilla debido al voltaje de pulso aplicado.
- Radio de protección alrededor de la varilla Franklin energizada.

De igual forma, no se ahondará en el estudio de este tipo de protecciones, pero es importante mencionar los temas que hay que considerar antes de tomar decisiones sobre el diseño.

3.2.5 Hilos de guarda

Son cables desnudos, conductores, generalmente hecho de alambre de acero galvanizado, algunas veces contienen cables de comunicación de fibra óptica entre subestaciones. Su diseño se analiza en el apantallamiento de líneas aéreas, en donde la probabilidad de que un rayo impacte un conductor de fase o sobre el cable de guarda es aleatoria y depende de la corriente pico, la altura del conductor, y la separación del conductor respecto al cable de guarda, [17].

Existen modelos geométricos de las líneas de transmisión en donde se deben considerar alturas de la línea, disposición geométrica, altura del cable de guarda, además de las

distancias críticas en forma de radio de circunferencia, para que después de varios cálculos se pueda determinar cuál es el diseño más óptimo del hilo de guarda para esa línea, considerando además niveles ceráunicos.

Los objetivos que cumplen los hilos de guarda son:

- Proteger los hilos conductores de descargas atmosféricas, y descargarlas a tierra.
- Proteger las torres de transmisión de descargas atmosféricas, dando un camino de descarga para el rayo hacia tierra.
- Las fallas de aislamiento se pueden ver reducidas al haber un acoplamiento eléctrico y magnético entre el cable de guarda y los hilos conductores, [17].

3.2.6 Aislamientos

Todos los elementos sometidos a un alto voltaje del SEP, deben cumplir con las normas de los niveles de aislamiento. El análisis de los niveles de aislamiento, según la Norma IEC 60071 y su traducción UNE 60071, tiene un procedimiento que consiste en pasos estructurados para determinar el nivel de aislamiento adecuado de una instalación de alto voltaje, es decir para una instalación todos sus elementos deberán cumplir con el nivel de aislamiento sugerido en la norma; mientras que, para otra instalación puede surgir otro distinto nivel de aislamiento. Esta decisión de diseño surge luego de aplicar los siguientes pasos de la norma:

1. Determinación de los sobrevoltajes representativos.
2. Determinación de los voltajes soportados de coordinación.
3. Determinación de los voltajes soportados especificados.
4. Elección del nivel de aislamiento.
5. Elección de los niveles de aislamiento normalizados.

Además, esta norma clasifica el voltaje en dos categorías: gamma I (voltajes menores a 400kV) y gamma II (voltajes mayores o iguales a 400kV); es decir, se clasifican por sus niveles de voltaje. Su principal diferencia en el estudio es que en gamma I se hace un estudio

determinístico de sobrevoltajes, mientras que en gamma II se hace un estudio estadístico/probabilístico de sobrevoltajes.

El nivel de aislamiento es el valor del mayor voltaje que puede soportar un equipo sin la ruptura de su aislamiento eléctrico, esta ruptura se puede dar por el alto voltaje potencial que en ciertos casos se produce en su aislamiento. En casos de potencia de cortocircuito elevada puede inclusive destruir el equipo. Existen distintos valores del nivel de aislamiento, que depende de la forma de onda del sobre voltaje y puede ser de dos tipos, como la Figura 10, lo indica, de baja frecuencia y transitoria, [18].

Clase	Baja frecuencia		Transitoria		
	Permanente	Temporal	De frente lento	De frente rápido	De frente muy rápido
Forma de tensión					
Rango de formas de tensión	$f = 50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3 \text{ 600 s} \geq T_1 \geq 0,03 \text{ s}$	$5 \text{ 000 } \mu\text{s} \geq T_p > 20 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \text{ } \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ } \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada de tensión	$f = 50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ T_1^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \text{ } \mu\text{s}$	*
Ensayo de tensión soportada normalizada	*	Ensayo de corta duración a frecuencia industrial	Ensayo de impulsos tipo maniobra	Ensayo de impulsos tipo rayo	*

* A especificar por el comité de producto concerniente.

Figura 9. Clases y formas de sobrevoltajes. Fuente: [22]

Las descargas atmosféricas son ondas transitorias de frente rápido, se pueden simular impulsos tipo rayo en el laboratorio para probar distintos niveles de aislamiento para sistemas de protecciones contra este fin.

Tipo de Onda	Nivel de Aislamiento
S.V Atmosférico	BIL (Basic Impulse Lightning Level)

Tipo de Onda	Nivel de Aislamiento
S.V Maniobra	BSL (Basic Surge Withstand Level)
S.V Temporal	Frecuencia Industrial

Tabla 4. Nivel de aislamiento según la Norma IEC 60071-1

De acuerdo al tipo de onda, se aplica un distinto nivel de aislamiento. El nivel básico de aislamiento BIL también conocido como nivel de onda completa o nivel básico al impulso NBI, es el valor de voltaje que un aislamiento puede soportar repetidamente sin que se presente una descarga disruptiva, es decir, el nivel de voltaje seguro que puede soportar sin problemas. Cada clase de aislamiento tiene su nivel particular de impulso, asociado con las pruebas que se los realiza, la resistencia de aislamiento a los voltajes de impulso es diferente a la resistencia de aislamiento normal para voltajes nominales con frecuencia de 60Hz. Por esta razón hay 3 pruebas de impulso básicas que son:

1. Frente de onda
2. Onda cortada
3. Onda completa

[7]

3.2.7 Sistemas de tierra

Un sistema de tierra o también llamado red de tierras, es un medio que permite la dispersión de una corriente no deseada, mediante distintos elementos como varillas, electrodos activos, cable desnudo o la combinación de varios de estos elementos creando así las mallas de tierra.

Se deben considerar los siguientes aspectos para el diseño de una malla:

1. Corriente del rayo
2. Corriente de falla a tierra
3. Conexión a tierra del equipo de protección y medición
4. Conexión a tierra de la carcasa y estructura

Estas consideraciones nos permiten un buen dimensionamiento del calibre de los conductores que necesita la malla, así como lograr una óptima conductividad para que la falla se pueda despejar de una forma adecuada, [7].

Cuando no se logra la conductividad deseada, existen formas de “mejoramiento de tierras” que son las siguientes:

1. Electrodo múltiples. Se pueden aumentar el número de electrodos o varillas, aumentando así el número de trayectorias en paralelo pero se deben tener en cuenta las distancias de separación de 1.8 a 3m, [7].
2. Tratamiento del terreno. Se hace para mejorar la conductividad, con sustancias como sulfato de cobre, cloruro de calcio, sulfato de magnesio, cloruro de sodio, o actualmente viene una mezcla de varias de estas en un polvo comercial llamado GEM (Ground Enhancement Material) de distintas marcas.

Factores como la humedad influyen mucho en la conductividad por las sales que hacen conductoras al terreno. Depende de la estructura y diseño que se esté realizando para hacer un tipo de malla adecuado, o en ciertos casos, es suficiente con varillas de cobre, pero para aplicaciones de diseños de bajo voltaje. Por ejemplo, para el diseño de mallas de puesta a tierra de subestaciones se tiene que seguir un procedimiento estricto por el nivel de importancia y riesgo que se tiene por niveles de voltaje y todos los equipos y personal a proteger. Según el estándar IEEE-80-2013 titulado “Guide for Safety in AC Substation Grounding” y resumiendo un poco se tienen los siguientes pasos:

1. Investigación de las características del suelo.
2. Determinación de la corriente máxima de falla. (Estudio de cortocircuitos)
3. Diseño preliminar de la malla.
4. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra. (Cumplir requerimientos de resistividad)
5. Cálculo del máximo aumento de potencial de la malla (GPR) en inglés, Grand Potencial Right.

6. Cálculo de voltajes de paso y de toque
7. Investigación de los potenciales de transferencia y puntos de mayor peligro
8. Corrección o refinamiento del diseño preliminar a los resultados del punto 6 y 7.
9. Construcción de la malla de puesta a tierra
10. Medición en campo de la resistencia del sistema de tierra
11. Revisión de los pasos 5, 6, 7 y 8 basados en los datos de campo
12. Modificación del sistema de tierras y/o adición de mallas y varillas según los resultados punto 11.

Como se puede observar el diseño de mallas de puesta a tierra para subestaciones es un tema bastante largo e influyen varios cálculos, [19].

Es distinto para otro tipo de aplicaciones menos estrictas, considerando solamente los primeros aspectos de diseño que se dieron en este apartado.

3.2.8 Relés

Un relé es un dispositivo que consta de una bobina y uno o varios contactos de circuitos distintos que al momento de recibir una señal de activación que puede ser una sobre corriente, se activa y aísla la falla. En subestaciones, estos relés controlan equipos de maniobra como disyuntores, capaces de abrir corrientes de cortocircuito para de igual forma, aislar fallas.

Existen 3 tipos de relés y son:

1. Electromecánicos: Son los más antiguos, su tiempo de respuesta es menor y ya su uso está descontinuado.
2. Digitales: Utilizan electrónica con compuertas lógicas, como and y or.
3. Estado sólido: También conocidos como relés numéricos, son programables y utilizan nueva tecnología de microprocesadores, ultra rápidos.

Existen varios estándares que indican las características que tienen que tener este tipo de relés, así como su nomenclatura dependiendo de lo que se va a proteger, como el IEEE Std

C37.2-2008. Varios cálculos son necesarios para determinar el tipo de relé a utilizar de acuerdo a curvas características en el estándar IEEE Std C37.2-2008. Como ejemplo se pone a continuación los nombres completos de los estándares útiles para relés de subestaciones, sin embargo, hay varios más que no se nombran.

1. IEEE C37.112-2018 - IEEE Standard for Inverse-Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays
2. IEEE Std C37.2-2008 - IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations.
3. UNE-EN 60255-127:2014 (Ratificada) Relés de medida y equipos de protección. Parte 127: Requisitos funcionales para la protección de sobretensiones y subtensiones.

Además de este tipo de relés que trabajan en subestaciones, únicamente dando una señal de activación para un interruptor grande como es un disyuntor, que haga el aislamiento de la falla, existen relés de protección contra sobretensiones para aplicaciones de bajo voltaje como instalaciones de una fábrica, de una empresa comercial, de casas o edificios. Las normas base para este tipo de fallas son:

- IEEE C62.41.2-2002 - Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and less) AC Power Circuits.
- UNE-EN 61643-11:2013 - Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias de baja tensión. Parte 11: Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias conectados a sistemas eléctricos de baja tensión. Requisitos y métodos de ensayo.

Un rayo causa sobretensiones transitorias, es por esto que se deben instalar un protector o también llamado, descargador, en la línea susceptible de recibir el sobrevoltaje, o descarga atmosférica, conectándolo en paralelo entre esta y tierra. De esta forma se derivará a tierra el

exceso de energía, limitando el valor del pico de tensión a un valor soportable por los equipos eléctricos conectados.

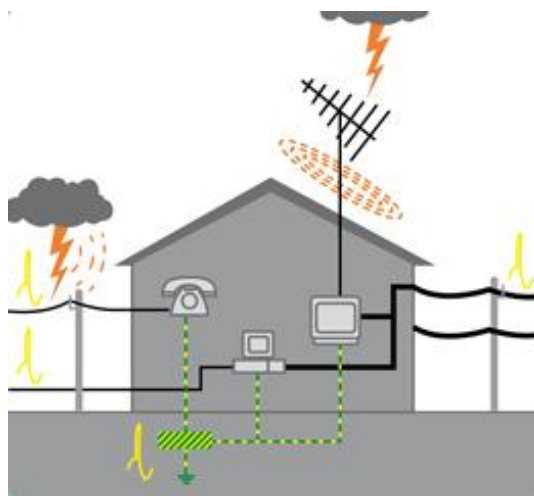


Figura 10. Riesgo de descargas atmosféricas y daños en BV. Fuente: [20]

Según IEC 61643-11 o su traducción UNE 61643-11 anteriormente mencionada, existen 3 clases de protecciones según la corriente, y separa las protecciones para red eléctrica, líneas de telecomunicaciones y datos, de la siguiente manera:

- Redes eléctricas: Clase 1, Clase 1+2, Clase 2, Clase 2+3, Clase 3, TVSS/SPD (IEEE)
- Líneas de telefónicas: ADSL, RDSI, PP.
- Ethernet: CAT.5, CAT.6, POE.
- Medición y control: DEVIC, RS232, RS485, 4-20mA, PROFIBUS, BINARIA, KNX-BUS, MODBUS, PTC.
- Radiofrecuencia: COAXIAL.

3.2.9 Protecciones por sitio

En resumen, los sistemas de protección contra descargas atmosféricas por sitio a proteger:

- En Subestaciones, principales elementos físicos.

Transformadores	TC & TP (Medición)	Seccionadores, disyuntores (Maniobra)
Hilos de guarda	Hilos de guarda	Hilos de guarda
Pararrayos	Pararrayos	Aisladores
Aisladores	Aisladores	Sistemas de tierra
Sistemas de tierra	Sistemas de tierra	
Relés de protección	Relés de protección	

Tabla 5. Protecciones para elementos principales de subestaciones.

En subestaciones eléctricas es muy importante mantener toda la subestación apantallada, el por esta razón que todos los componentes dentro de la subestación deben tener el hilo de guarda. También, todos los elementos de la subestación deben estar conectados a los sistemas de puesta a tierra como mallas de tierra, aunque sean solamente estructuras, para evitar inducción y que haya equipotencialización. Todos los elementos que tengan contacto con la línea deben tener su sistema de aislamiento, o aisladores para evitar que la sujeción se convierta en conductor y haya fugas de corriente. Los transformadores al ser los elementos más caros de la subestación deben estar sumamente protegidos, con pararrayos y distintos tipos de relés de protección, un sistema entero de protección con relés modernos y que mandan una señal ultra rápida a los elementos de maniobra para su apertura, están controlando y monitoreando constantemente las distintas variables del transformador. Los transformadores de potencia y de corriente también tienen que tener una buena protección con aisladores en la línea que entra y pararrayos para evitar problemas con las descargas atmosféricas.

En L/T.

Transmisión	Subtransmisión	Distribución
Hilos de guarda	Hilos de guarda (a veces)	Aislamientos
Sistemas de tierra	Sistemas de tierra	Fusibles
Aislamientos	Aislamientos	Pararrayos
	Pararrayos	Apartarrayos

Tabla 6. Protecciones para elementos en líneas, en las distintas etapas del SEP.

En líneas de transmisión, se coloca hilos de guarda, las torres deben estar conectadas físicamente a tierra, y tienen su respectiva cadena de aisladores para sujetar los cables. En líneas de subtransmisión, cuando el nivel cerámico es muy alto se pueden colocar hilos de guarda, igualmente los postes de subtransmisión es recomendable que estén conectados a tierra con pararrayos cada cierta distancia, cuando el nivel cerámico es muy alto, los pararrayos se colocan a una distancia más continua.

En líneas de distribución no se ven los hilos de guarda, pero por esta razón se tienen más elementos como apartarrayos, pararrayos en cada terminación de línea, o derivación a una estructura, además de protecciones en alto y bajo voltaje como fusibles para transformadores de distribución.

- En estructuras de obra civil. (Como edificios, locales comerciales)

Se recomienda poner puntas franklin en la terraza de los edificios, conectados a un sistema de tierra, como una malla de tierra que se encuentra en el sótano del mismo, además de relés de protección como sistemas contra sobretensiones (DPS), conectados al tablero principal para evitar sobrevoltajes muy altos si caen descargas atmosféricas sobre el edificio o estructuras civiles altas, en donde se justifique la inversión.

3.3 Medidas de protección contra descargas atmosféricas.

Además de los aparatos en sí, la Norma IEC 62305 da una serie de recomendaciones o medidas, para lograr una correcta protección contra descargas atmosféricas.

Las medidas de protección para salvaguardar a personas o instalaciones, usando como referencia la Norma IEC 62305 son:

1. Medidas de protección para reducir los daños a personas por tensiones de paso y de contacto.
2. Medidas de protección para reducir los daños físicos.

3. Medidas de protección para reducir los fallos de los sistemas eléctricos y electrónicos
4. Elección de las medidas de protección.

Para desarrollar esta idea, primeramente, se debe definir lo que es un voltaje de paso y un voltaje de toque. Se consultó la IEEE Std. 80-2013. En donde, estos voltajes hacen referencia a la tolerancia que el cuerpo humano tiene a la corriente eléctrica. Las variables que determinan la afectación al cuerpo humano son: frecuencia, magnitud (corriente) y la duración de la corriente a través del cuerpo.

Voltaje de paso: La diferencia en el potencial de superficie experimentado por una persona que “puentea” una distancia de 1 m con los pies sin tocar ningún otro objeto conectado a tierra.

Voltaje de toque o contacto: La diferencia de potencial entre el aumento del potencial de tierra (GPR) y el potencial de superficie en el punto donde una persona está parada mientras al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura. Las mediciones de voltaje de toque pueden ser "circuito abierto" (sin la resistencia equivalente del cuerpo incluido en el circuito de medición) o "circuito cerrado" (con la resistencia del cuerpo equivalente incluida en el circuito de medida), [19].

3.3.1 Medidas de protección para reducir los daños a personas por tensiones de paso y de contacto.

- Aislar correctamente las partes conductoras a las que una persona pueda tener acceso.- Siempre hay que tener cuidado del aislamiento ya que si llegara a caer una descarga eléctrica y una persona está en contacto con una parte que no esté aislada puede sufrir una electrocución y dependiendo de ciertos factores como el tiempo de exposición, el trayecto de la corriente, se podría tener quemaduras, heridas e incluso la muerte.

- Colocación de un sistema de puesta a tierra mallado para la equipotencialización.- El sistema de puesta a tierra es esencial para que no haya voltajes remanentes por inducción en líneas de transmisión o entre equipos y estructuras, además ayuda al correcto funcionamiento de equipos asegurando una tierra con 0V.
- Restricciones físicas y carteles de advertencia.- Para pasar a lugares energizados, o con riesgo eléctrico siempre es necesario candados, carteles, etc.

Nota 1: La equipotencialización no es eficaz contra las tensiones de contacto.

Nota 2: El riesgo de muerte puede reducirse mediante un aumento de la resistividad de la superficie del suelo, tanto en el interior como en el exterior de la estructura.

[19]

3.3.2 Medidas de protección para reducir los daños físicos.

- Para las estructuras: Sistemas de protección contra el rayo (SPCR)

Las estructuras pueden sufrir también daños físicos, cuando surge una descarga eléctrica, por ejemplo, deterioro de las torres de transmisión por el calor que genera una descarga eléctrica, etc. Además, que para descargas atmosféricas se tiene que poner distintos equipos de protección como, por ejemplo, una punta franklin conectada directamente con un cable a una malla de tierra para descargar la corriente.

Nota 1: Cuando se instala un SPCR, la equipotencialización es una medida muy importante para reducir los riesgos de fuego, explosión y muerte.

Nota 2: Los dispositivos limitan el desarrollo y la propagación de un incendio tales como compartimientos estancos, extintores, hidrantes, instalaciones de detección y extinción de incendio, pueden reducir los daños físicos.

Nota 3: Las rutas de escape protegidas aseguran la protección de personas.

Nota 4: Se realiza una protección muy eficaz en los cables enterrados, mediante el uso de conductos metálicos.

- Para los servicios: Apantallamientos.

Al mencionar los servicios, se refiere al servicio de energía eléctrica, que es suministrado gracias a distintas etapas del sistema eléctrico de potencia, desde la generación, transmisión, subtransmisión, distribución y consumo. Los apantallamientos existen tanto en líneas de transmisión con los OGW (Overhead Ground Wire) que son los cables de guarda, que, además, también se colocan en las subestaciones para un correcto apantallamiento, con esto aseguramos un correcto suministro de energía eléctrica, confirmando parámetros de seguridad, confiabilidad del SEP. Entonces, una medida para reducir el daño físico de los servicios, es decir para que no se interrumpa el servicio de energía eléctrica es el apantallamiento.

[19]

3.3.3 Medidas de protección para reducir los fallos de los sistemas eléctricos y electrónicos.

- **Para las estructuras:** Sistemas de protección contra el IEMR, que es el “Impulso Electromagnético del Rayo”, formado por las siguientes medidas que se tomen, pueden ser solas o en combinación:
 - Puesta de tierra y equipotencialidad.- Cuando cae una descarga eléctrica en estructuras, es muy posible que, si no existe una puesta a tierra para estructuras, estas se induzcan con un voltaje que puede dañar los sistemas eléctricos y electrónicos.
 - Pantalla magnética.- La pantalla magnética es necesaria en estructuras como cámaras de transformación cerradas, cabinas de distribución de energía en subestaciones, en donde sea necesario un recubrimiento de las paredes con placas de apantallamiento, como forma de mitigación electromagnética. Para precautelar sistemas eléctricos y electrónicos, [21].
 - Trazado de la línea.- En la construcción de líneas de transmisión es siempre necesario una buena planificación para que la línea cumpla con parámetros económicos y técnicos, en los que incluye el nivel cerámico, que la línea de

transmisión en lo posible, pase por donde no haya mucha incidencia de rayos y con esto evitar problemas para los sistemas eléctricos y electrónicos.

- Protección coordinada con dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias.- Los rayos pueden ocasionar sobretensiones transitorias y se los mitiga con equipos de protección llamados protectores contra sobretensiones transitorias (DPS). Posteriormente se va a indicar con más detalle lo que son, y como se coordina su funcionamiento.

- **Para los servicios:** Se pueden utilizar dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias colocados en diferentes lugares a lo largo del recorrido de la línea y en la terminación de la línea.

Tal como se indicó antes, respecto a los servicios esta norma se refiere más a la parte del servicio de energía eléctrica, es decir respecto al SEP. En el recorrido de la línea podemos encontrar apartarrayos, mientras que en la terminación de la línea los pararrayos.

- Apantallamiento magnético de los cables. Cuando existen soterramientos, es indispensable el apantallamiento con mantas aislantes.

Nota 1: Se realiza una protección muy eficaz en los cables enterrados por medio de conductos metálicos de espesor apropiado.

Nota 2: La redundancia de recorridos, de equipos, los grupos generadores de potencia autónomos, los sistemas de alimentación ininterrumpidos, los sistemas de almacenamiento de fluidos y los sistemas automáticos de detección de faltas, son medidas eficaces para reducir la pérdida de actividad de los servicios.

Nota 3: Una medida de protección eficaz contra los fallos debidos a las sobretensiones, consiste en aumentar la tensión soportada del aislamiento de los equipos y cables, [19].

3.3.4 Elección de las medidas de protección.

Siempre se tiene que poner de acuerdo el propietario y el diseñador, para elegir el tipo de protección adecuada, por los parámetros técnicos necesarios, primeramente, además del aspecto económico. En la Norma IEC 62305-2 se exponen los criterios para evaluar el riesgo y para poder elegir apropiadamente las medidas de protección.

CAPÍTULO IV

INFLUENCIA DEL NIVEL CERAÚNICO EN EL SEP

Los diseños de líneas de transmisión y subestaciones deben ser basados en la información de mapas isoceraúnicos, aunque una medida más tangible que el número de días al año con tormenta eléctrica es, la densidad de rayos a tierra que es un valor medido por la cantidad de descargas / km²-año.

Vale la pena mencionar que en inglés al nivel ceraúnico se lo conoce como “keraunic level” y al nivel isoceraúnico como “isokeraunic level”. Donde su principal diferencia está en que como lo habíamos indicado anteriormente, el nivel ceraúnico es el número anual de días con tormenta eléctrica; mientras que el isoceraúnico es el promedio de días con tormenta eléctrica en un año, es por esto que al tener un promedio se logran trazar las líneas “iso” o iguales, [22].

4.1 Cálculo de la densidad de rayos a tierra (DRT) o Ground Flash Density (GFD).

Es necesaria tener una cantidad tangible de descargas eléctricas mas no, solo los días de tormenta al año, es por esto que se calcula la DRT o GFD. De la siguiente manera:

$$Nk = 0.12 * Td \quad (5)$$

Donde:

Nk: Número de descargas atmosféricas a tierra por kilómetro cuadrado por año.

Td: Es el valor ceraúnico promedio, es decir el promedio de días con tormenta en un año.

Este cálculo de densidad de rayos a tierra también se lo puede calcular mediante dos formas, la primera forma es mediante el concepto de “día con tormenta eléctrica”. Un día con tormenta eléctrica es cuando se escucha al menos un estruendo de rayo en todo el día, es por esto, que es una medida no tan exacta. O la otra forma es calculándolo con el concepto de “hora con tormenta eléctrica”. Una hora con tormenta eléctrica es cuando se escucha al menos un estruendo en una hora, si es así, ya se lo clasificará como una hora con tormenta.

Actualmente se intenta mantener un nivel ceraúnico por hora, esto hace que se aumente la precisión y se mejore en las estimaciones de las descargas atmosféricas por zona.

$$Nk = 0.054 * Th^{1.1} \quad (6)$$

Donde:

Nk: Número de descargas atmosféricas a tierra por kilómetro cuadrado por año.

Td: Es el valor ceraúnico promedio en un año, en horas de tormenta.

[22]

Cabe recalcar además que no es una fórmula absoluta ya que puede variar dependiendo de la locación. Por ejemplo:

Lugar	Densidad de Rayos a Tierra (DRT) Descargas a tierra / km ² /año.
Mundo (Áreas templadas)	$0.040 * Td^{1.25}$
México	$0.024 * Td^{1.12}$
Brasil	$0.030 * Td^{1.12}$
Mundo (Clima templado)	$0.15 * Td$

Tabla 7. Relaciones empíricas entre la densidad de descargas de rayos a tierra (DRT) y los días con tormenta en un año (Td). Fuente: [26]

La base de datos utilizada del sensor satelital LIS muestra directamente la densidad de rayos a tierra.

4.2 Cálculo de SFR

Para un correcto apantallamiento de líneas de transmisión se utiliza el modelo electro-geométrico o por sus siglas en inglés (EGM) en donde se investiga el desempeño de la línea cuando existen descargas atmosféricas, de esta forma buscando lograr un buen diseño.

Dentro de este modelo se puede encontrar el (SFR) que traducido sería, tasa de fallo de apantallamiento. Como bien sabemos, no se puede lograr una efectividad del 100% o 0 fallos en temas como las descargas atmosféricas ya que son fenómenos probabilísticos, es por esto que existe este índice o tasa para poder mitigar los fallos intentando que sean muy raros que ocurran, es decir que esta tasa de fallos sea baja. Es un cálculo complejo ya que se necesita de varios pasos y softwares de simulación. En pocas palabras, se debe crear una malla imaginaria en donde se tenga una separación en cuadrados pequeños de largo dx y de ancho dy , además de saber la distancia total del espacio imaginario a la largo, D . Además de la determinación de una corriente mínima y máxima con que el líder del rayo descendente golpea los cables de fase. [23]

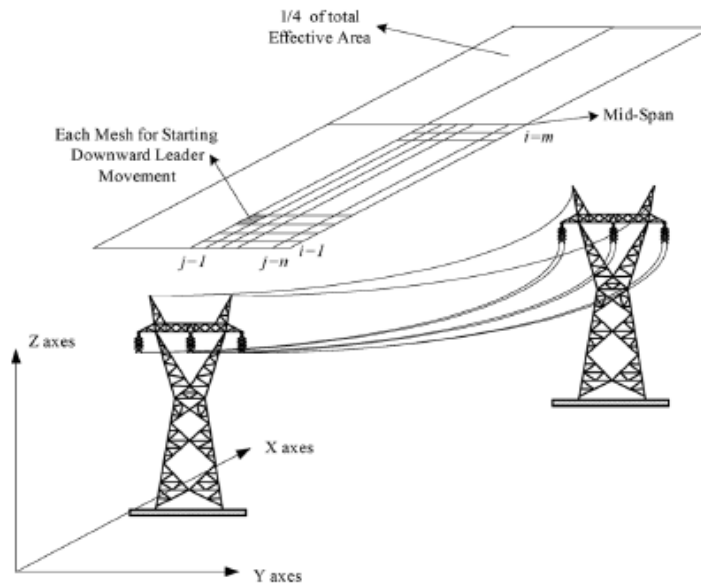


Figura 11. Tramo de línea aérea y su malla inicial “imaginaria” para cálculos de diseño. Fuente: [27]

Su fórmula es la siguiente:

$$SFR_{ij} = 0.1 \times GFD \times \frac{dx}{D} dy \times [P(I_{max}) - P(I_c)] \quad (7)$$

En donde:

- dx (en metros), dy (en metros) son el largo y ancho de los cuadrados de la malla.
- D es el largo del espacio de la malla o (distancia de la L/T).
- SFR_{ij} es la tasa de falla por apantallamiento (en descargas/100 km-año) de la malla ij para las corrientes que exceden I_c (La corriente crítica).

- $P(I)$ es la función de distribución de probabilidad de que exista la primera descarga que exceda la corriente máxima y se produzca una falla en el apantallamiento.

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (8)$$

- GFD por sus siglas en inglés “Ground Flash Density” o en español, DRT, densidad de rayos eléctricos a tierra, (descargas/ km^2 -año).

[23]

El cálculo de SFR es muy importante en el diseño de L/T, existen varias formas de poder calcularlo y se necesita el GFD o el Td que son el número de días con tormentas en el año o nivel cerámico. El propósito de esta investigación es ayudar con este coeficiente para la mejora de diseño.

4.3 Evaluación de la salida de líneas al año por caída de rayos.

En la fase de diseño de un proyecto de L/T es importante evaluar este parámetro ya que la salida de una línea, se traslada a los costos que se ven en análisis económico del SEP, como costos de energía no suministrada, es decir es una pérdida de recursos importante.

Las salidas de L/T por caída de rayos pueden ser por falla en el blindaje y por falla de sobrevoltajes de flameo o llamado retorno, (se puede generar un arco desde el apoyo o torre a la fase, del hilo de tierra a la fase o de la fase al apoyo, si la sobretensión supera la tensión de aguante BIL). En donde se tiene la siguiente fórmula:

$$NL = 0.004 \times Tc^{1.35} (hesp + 4Hg^{1.09}) \text{ Índice de fallas/100 km - año} \quad (9)$$

En donde:

- NL es el número de salida de línea en 100 Km/año.
- Tc el nivel cerámico por donde pasa la línea
- Hg la altura promedio de los hilos de guarda en metros
- hesp el esparcimiento horizontal entre hilos de guarda en metros.

[9]

CAPÍTULO V

MARCO METODOLÓGICO

El marco metodológico se dividirá en dos partes, en la primera parte se va a explicar cómo se obtuvo los mapas isocerúnicos y de descargas de rayos a tierra, mientras que, en la otra se va a explicar cómo se realizó la aplicación en Matlab.

5.1 Mapa isoceraúnico y densidad de descargas atmosféricas.

Para crear los mapas, se consultó al INAMHI sobre la existencia de datos de descargas atmosféricas, al inicio un experto aseguró que sí existían, pero no en todas las estaciones meteorológicas, posteriormente al revisar las bases de datos, se verificó que no había ningún dato sobre este fenómeno natural en el Ecuador, razón por la cual se empezó a investigar sobre datos de la NASA, ya que son compartidos de forma gratuita. Los datos del satélite LIS de la NASA, son los que mejor pueden servir para este proyecto, ya que el área de concesión es relativamente pequeña, por lo que se necesitaba de una fuente con una resolución alta, como son estos datos, que tienen resolución de 0.1 grados geográficos por cada uno, se buscaron otras fuentes pero no tenían registros de tantos años como esta base de datos, y la resolución era mucho más grande, por ejemplo de 1 grado geográfico, lo cual no sería lo óptimo para esta investigación. Los datos se encuentran en formato .nc (netCDF) que es un formato muy común para guardar bases de datos muy grandes con propósitos de investigación del clima, y distintos sucesos del planeta con datos georreferenciados. Existen varios softwares que son compatibles con las mencionadas bases de datos, pero de forma muy distinta cada uno de ellos, por ejemplo, el software “Panoply” de la NASA, o arcGIS, con ArcMap y la herramienta Multidimension Tools, que fue la utilizada en el presente documento.

En la Tabla 9, se muestran los datos por longitud y latitud que especifica el valor de Flash Rate Density (FRD) o densidad de descargas atmosféricas, que están en unidades: Descargas por km^2 y por día ($\frac{descargas}{km^2 * día}$). En este punto cabe recalcar, que el sensor satelital LIS,

mediante su sensor óptico no distingue el tipo de descarga atmosférica, es decir, si fue una descarga en la misma nube, entre nubes, o si se produjo la descarga a tierra. En algunas investigaciones, a esta densidad de descargas, se lo denomina directamente, Ground Flash Density (GFD), también llamado en español, Densidad de Rayos a Tierra (DRT). La única forma actual de tener el dato de descargas atmosféricas a tierra 100% exacta y precisa, es con una medición directamente en campo con sensores. Es por esto que se aclara que estos datos son una aproximación, ya que las descargas atmosféricas a tierra son una fracción de las descargas atmosféricas totales. Los datos fueron obtenidos de un periodo de 16 años, desde el año 1998 hasta el año 2013. Es decir, con un análisis de cinco mil ochocientos cuarenta días (5840) por cada punto de latitud y longitud en el mapa, que son 208 coordenadas separadas en una grilla de 0.1 grados de coordenada geográfica, tanto de latitud como de longitud. Lo que muestra un total de un millón doscientos catorce mil setecientos veinte (1214720) días de análisis para obtener la actualización del mapa isoceraúnico dentro del área de concesión de la EEQ.

Número	Abreviatura, meses del año	Estación climática	Meses
1	DJF	Invierno	Diciembre – Febrero
2	MAM	Primavera	Marzo – Mayo
3	JJA	Verano	Junio – Agosto
4	SON	Otoño	Septiembre – Noviembre

Tabla 8. Resumen de abreviaturas para meses del año y su estación climática. Fuente: [24]

A continuación, se indica en la Tabla 9, los valores ceráunicos, y de densidad de rayos a tierra de los meses DJF, MAM, JJA, SON. Para obtener el valor de descargas atmosféricas a tierra en un año, se sumó y se hizo un promedio, como podemos observar en la ecuación (11), este es el valor que se utilizó para obtener el nivel isoceraúnico ya que es el número de días de tormenta en un año. Cada dato se encuentra georreferenciado con latitud y longitud decimales, para después poder pasarlas a un mapa.

En el mapa creado por INECEL hace más de 25 años, coloca a la ciudad del Puyo como el sitio que tiene el mayor nivel ceráunico, Figura 6, con un valor de 120 días de tormenta al

año, sin embargo, solo en el área de concesión de la EEQ, se ha evidenciado que esto ha cambiado significativamente, ya que en esta investigación el valor máximo de nivel ceráunico obtenido es el de 182 días con tormenta eléctrica en el año, correspondiente al sector selvático de la Parroquia San José de Payamino, observar, Tabla 9.

A nivel del área de concesión de la EEQ, existe una variación de la densidad de descargas atmosféricas de un mínimo de 2,92301125 a un máximo de 21,9428875 (Descargas/km²-año). En la Figura 12, se puede observar una tendencia hacia valores mayores a 5 (Descargas/km²-año), a partir del dato número 150.

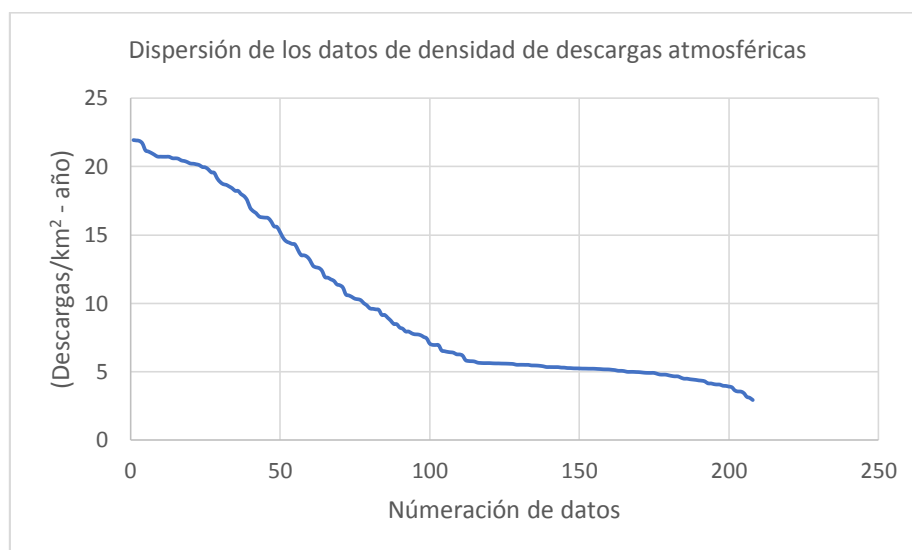


Figura 12. Dispersión de los datos de densidad de descargas atmosféricas (Descargas/km² - año)

Utilizando la relación (5), podemos determinar que para 5 (Descargas/km² - año) le corresponde un nivel ceráunico de 42 (Días con tormenta eléctrica al año). Con lo que podemos concluir que el 72% del área de concesión de la EEQ tiene valores más altos que 5 (Descargas/km² - año) y que 42 (Días con tormenta eléctrica al año). Pero en contraste, también se puede indicar que son zonas en donde no existe tan alta cantidad de usuarios, como podemos observar en la **Figura. 28**, en la sección de resultados, las zonas en donde hay más alto número (DRT) son cantones con poblaciones pequeñas.

La principal ciudad a la que da servicio la EEQ, por lo tanto, la de mayor población y mayor número de instalaciones eléctricas es Quito, y sin embargo esta ciudad se encuentra en el rango de 4.85 (Descargas/km² - año). Es decir, 40 (Días con tormenta eléctrica al año), la ciudad de Quito se encuentra en el 28% restante de los datos que tienen un bajo nivel ceráunico. Por lo que es algo bueno, ya que si fuera de otra manera, se tendría que hacer varios refuerzos por descargas atmosféricas a líneas, estructuras, etc.

OBTENCIÓN DE LOS VALORES CERÁUNICOS.

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A ÑO	TD (ISOCERA UNICO)
SAN JOSE DE PAYAMINO	-0,45	-77,25	0,062394	0,056918	0,02739	0,093768	0,0601175	21,9428875	182,857396
SAN JOSE DE PAYAMINO	-0,55	-77,25	0,061069	0,056456	0,027526	0,095104	0,06003875	21,9141438	182,617865
SAN LUIS DE ARMENIA	-0,35	-77,25	0,063327	0,05938	0,026707	0,090358	0,059943	21,879195	182,326625
NUEVO PARAÍSO (CAB. EN UNIÓN)	-0,25	-77,25	0,063758	0,061609	0,028127	0,084273	0,05944175	21,6962388	180,80199
SAN JOSE DE PAYAMINO	-0,55	-77,35	0,058607	0,053487	0,026648	0,093553	0,05807375	21,1969188	176,64099
AVILA (CAB. EN HUIRUNO)	-0,75	-77,25	0,057742	0,048507	0,026432	0,0986	0,05782025	21,1043913	175,869927
SAN JOSE DE PAYAMINO	-0,45	-77,35	0,058914	0,052792	0,026245	0,092156	0,05752675	20,9972638	174,977198
SAN JOSE DE DAHUANO	-0,75	-77,35	0,056609	0,04727	0,026368	0,098475	0,0571805	20,8708825	173,924021
SAN JOSE DE DAHUANO	-0,85	-77,45	0,054087	0,045904	0,02487	0,102399	0,056815	20,737475	172,812292
EL DORADO DE CASCALES, PANDUYACU	-0,05	-77,25	0,060189	0,060809	0,028294	0,077876	0,056792	20,72908	172,742333
PARQUE NAC. SUMACO-NAPO- GALERA	-0,35	-77,35	0,058898	0,054421	0,025292	0,088504	0,05677875	20,7242438	172,702031
SAN JOSE DE DAHUANO	-0,85	-77,35	0,054851	0,046499	0,0254	0,100361	0,05677775	20,7238788	172,69899
CHONTAPUNTA	-0,85	-77,25	0,055029	0,047416	0,024825	0,099796	0,0567665	20,7197725	172,664771
CHONTAPUNTA	-1,05	-77,45	0,051507	0,045515	0,02337	0,105514	0,0564765	20,6139225	171,782688
AHUANO	-0,95	-77,45	0,053012	0,045128	0,024369	0,103358	0,05646675	20,6103638	171,753031
COMUNA 24 DE MAYO	-0,75	-77,45	0,055081	0,04562	0,025347	0,099481	0,05638225	20,5795213	171,49601

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A Ño	TD (ISOCERA UNICO)
CHONTAPUNTA	-0,95	-77,35	0,053549	0,044705	0,024775	0,101105	0,0560335	20,4522275	170,435229
AHUANO	-1,05	-77,55	0,050651	0,045151	0,022104	0,105785	0,05592275	20,4118038	170,098365
CHONTAPUNTA	-0,95	-77,25	0,053408	0,045429	0,024115	0,099894	0,0557115	20,3346975	169,455813
CHONTAPUNTA	-1,05	-77,35	0,051057	0,044265	0,023449	0,102922	0,05542325	20,2294863	168,579052
SAN JOSE DE PAYAMINO	-0,55	-77,45	0,054661	0,048043	0,025646	0,09318	0,0553825	20,2146125	168,455104
PARQUE NAC. SUMACO-NAPO- GALERA	-0,25	-77,35	0,05853	0,055604	0,026428	0,080484	0,0552615	20,1704475	168,087063
AHUANO	-0,95	-77,55	0,051445	0,044297	0,022838	0,101849	0,05510725	20,1141463	167,617885
AHUANO	-0,85	-77,55	0,051897	0,044103	0,023023	0,099896	0,05472975	19,9763588	166,469656
CHONTAPUNTA	-1,05	-77,25	0,05051	0,044701	0,022659	0,100724	0,0546485	19,9467025	166,222521
PARQUE NAC. SUMACO-NAPO- GALERA	-0,45	-77,45	0,054196	0,046776	0,025044	0,091016	0,054258	19,80417	165,03475
HATUN SUMAKU	-0,75	-77,55	0,052403	0,043756	0,023208	0,095252	0,05365475	19,5839838	163,199865
PUERTO MISAHUALLI	-1,05	-77,65	0,048264	0,04342	0,021041	0,101475	0,05355	19,54575	162,88125
PARQUE NAC. SUMACO-NAPO- GALERA	-0,35	-77,45	0,052609	0,047422	0,023601	0,086128	0,05244	19,1406	159,505
PUERTO MISAHUALLI	-0,95	-77,65	0,047591	0,041963	0,021489	0,095823	0,0517165	18,8765225	157,304354
EL DORADO DE CASCALES	0,25	-77,25	0,055607	0,056213	0,025231	0,068078	0,05128225	18,7180213	155,98351
AVILA (CAB. EN HUIRUNO)	-0,55	-77,55	0,050487	0,043742	0,022644	0,087721	0,0511485	18,6692025	155,576688
GONZALO PIZARRO, DASHIÑO	-0,05	-77,35	0,054458	0,054353	0,024963	0,069472	0,0508115	18,5461975	154,551646

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A ÑO	TD (ISOCERA UNICO)
SAN PABLO DE USHPAYACU	-0,85	-77,65	0,047216	0,041129	0,021611	0,091885	0,05046025	18,4179913	153,48326
PARQUE NAC. SUMACO-NAPO- GALERA	-0,25	-77,45	0,051718	0,047929	0,024069	0,076082	0,0499495	18,2315675	151,929729
PARQUE NAC. SUMACO-NAPO- GALERA	-0,45	-77,55	0,049912	0,042222	0,022043	0,085533	0,0499275	18,2235375	151,862813
PUERTO NAPO	-1,05	-77,75	0,0443	0,040323	0,019081	0,093383	0,04927175	17,9841888	149,86824
HATUN SUMAKU	-0,75	-77,65	0,047465	0,04022	0,021509	0,086268	0,0488655	17,8359075	148,632563
PARQUE NAC. SUMACO-NAPO- GALERA	-0,35	-77,55	0,047908	0,042829	0,020954	0,080566	0,04806425	17,5434513	146,195427
SAN PABLO DE USHPAYACU	-0,95	-77,75	0,042618	0,038205	0,018655	0,086741	0,04655475	16,9924838	141,604031
HATUN SUMAKU	-0,55	-77,65	0,045129	0,038938	0,020194	0,079282	0,04588575	16,7482988	139,569156
PARQUE NAC. SUMACO-NAPO- GALERA	-0,25	-77,55	0,046845	0,042363	0,021797	0,07087	0,04546875	16,5960938	138,300781
COTUNDO	-0,85	-77,75	0,04166	0,036713	0,018502	0,082335	0,0448025	16,3529125	136,274271
LINARES	-0,45	-77,65	0,04412	0,037398	0,019611	0,077434	0,04464075	16,2938738	135,782281
PANO	-1,05	-77,85	0,040969	0,037067	0,016109	0,084164	0,04457725	16,2706963	135,589135
GONZALO PIZARRO, SIMÓN BOLIVAR	-0,05	-77,45	0,047642	0,045426	0,021874	0,063032	0,0444935	16,2401275	135,334396
EL DORADO DE CASCALES	0,25	-77,35	0,047794	0,048787	0,021499	0,057214	0,0438235	15,9955775	133,296479
COTUNDO	-0,75	-77,75	0,041322	0,035508	0,018336	0,076139	0,04282625	15,6315813	130,263177

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A Ño	TD (ISOCERA UNICO)
PARQUE NAC. SUMACO-NAPO-GALERA	-0,35	-77,65	0,041724	0,037742	0,018518	0,072789	0,04269325	15,5830363	129,858635
SAN JUAN DE MUYUNA	-0,95	-77,85	0,038921	0,034567	0,01542	0,077812	0,04168	15,2132	126,776667
GONZALO DIAZ PINEDA (EL BOMBON)	-0,25	-77,65	0,040742	0,037011	0,019364	0,065079	0,040549	14,800385	123,336542
EL REVENTADOR	-0,05	-77,55	0,042256	0,039294	0,019757	0,058092	0,03984975	14,5451588	121,209656
COTUNDO	-0,85	-77,85	0,03727	0,033255	0,014832	0,07294	0,03957425	14,4446013	120,371677
COTUNDO	-0,55	-77,75	0,037727	0,033104	0,016849	0,069563	0,03931075	14,3484238	119,570198
TALAG	-1,05	-77,95	0,036072	0,032226	0,013956	0,074521	0,03919375	14,3057188	119,214323
SUMACO	-0,45	-77,75	0,036434	0,031522	0,016605	0,067758	0,03807975	13,8991088	115,825906
COTUNDO	-0,75	-77,85	0,035682	0,031842	0,014598	0,066176	0,0370745	13,5321925	112,768271
PUERTO LIBRE	0,25	-77,45	0,041175	0,039589	0,018529	0,048776	0,03701725	13,5112963	112,594135
PANO	-0,95	-77,95	0,034093	0,030211	0,013333	0,069359	0,036749	13,413385	111,778208
EL CHACO	-0,35	-77,75	0,03395	0,030758	0,015544	0,063924	0,036044	13,15606	109,633833
COTUNDO	-0,85	-77,95	0,032731	0,029331	0,012682	0,065002	0,0349365	12,7518225	106,265188
TALAG	-1,05	-78,05	0,031697	0,029063	0,011908	0,065788	0,034614	12,63411	105,28425
EL REVENTADOR, SAN RAFAEL	-0,05	-77,65	0,035823	0,03332	0,017249	0,051523	0,03447875	12,5847438	104,872865
SANTA ROSA	-0,25	-77,75	0,03305	0,029788	0,016387	0,056531	0,033939	12,387735	103,231125
COTUNDO	-0,75	-77,95	0,030646	0,028112	0,012915	0,058978	0,03266275	11,9219038	99,3491979
COSANGA	-0,55	-77,85	0,030416	0,028083	0,013776	0,057864	0,03253475	11,8751838	98,9598646

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A Ño	TD (ISOCERA UNICO)
PANO	-0,95	-78,05	0,029338	0,027113	0,011416	0,060898	0,03219125	11,7498063	97,9150521
ROSA FLORIDA	0,25	-77,55	0,035215	0,033215	0,01632	0,042852	0,0319005	11,6436825	97,0306875
SAN FCO. DE BORJA (VGLO. DAVILA)	-0,45	-77,85	0,028243	0,026629	0,013617	0,056267	0,031189	11,383985	94,8665417
TALAG	-1,05	-78,15	0,028133	0,026599	0,009555	0,059751	0,0310095	11,3184675	94,3205625
ARCHIDONA	-0,85	-78,05	0,027997	0,026072	0,011153	0,057029	0,03056275	11,1554038	92,9616979
SARDINAS	-0,35	-77,85	0,025291	0,025524	0,012718	0,053161	0,0291735	10,6483275	88,7360625
COTUNDO	-0,75	-78,05	0,02597	0,025181	0,011247	0,053497	0,02897375	10,5754188	88,1284896
PANO	-0,95	-78,15	0,025722	0,025149	0,009044	0,054815	0,0286825	10,4691125	87,2426042
EL REVENTADOR	-0,05	-77,75	0,028531	0,026359	0,014403	0,043987	0,02832	10,3368	86,14
TALAG	-1,05	-78,25	0,025487	0,024992	0,008304	0,054062	0,02821125	10,2971063	85,8092188
COSANGA	-0,55	-77,95	0,02516	0,023115	0,012382	0,051447	0,028026	10,22949	85,24575
PANO	-0,85	-78,15	0,024412	0,024766	0,008988	0,051459	0,02740625	10,0032813	83,3606771
SANTA ROSA	-0,25	-77,85	0,023573	0,024484	0,013558	0,046412	0,02700675	9,85746375	82,1455313
LA SOFIA	0,25	-77,65	0,027612	0,026385	0,014069	0,037464	0,0263825	9,6296125	80,2467708
BAEZA	-0,45	-77,95	0,022466	0,021342	0,012119	0,049267	0,0262985	9,5989525	79,9912708
TALAG	-0,95	-78,25	0,023291	0,024115	0,007774	0,049574	0,0261885	9,5588025	79,6566875
ARCHIDONA	-0,75	-78,15	0,022597	0,024027	0,008957	0,048762	0,02608575	9,52129875	79,3441563
PANO	-0,85	-78,25	0,021912	0,024244	0,007948	0,046274	0,0250945	9,1594925	76,3291042
COSANGA	-0,55	-78,05	0,020587	0,019957	0,010429	0,049259	0,025058	9,14617	76,2180833

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A Ño	TD (ISOCERA UNICO)
OYACACHI	-0,35	-77,95	0,019279	0,021145	<u>0,011391</u>	0,046148	0,02449075	8,93912375	74,4926979
ARCHIDONA	-0,75	-78,25	0,020221	0,023895	0,007938	0,043692	0,0239365	8,7368225	72,8068542
SAN JOSE DE POALO	-1,05	-78,35	0,021562	0,022316	0,006718	0,042438	0,0232585	8,4893525	70,7446042
CUYUJA	-0,45	-78,05	0,017508	0,018161	0,010354	0,046811	0,0232085	8,4711025	70,5925208
CUYUJA	-0,55	-78,15	0,017172	0,019593	0,00764	0,045788	0,02254825	8,23011125	68,5842604
OYACACHI	-0,25	-77,95	0,017348	0,020266	0,012402	0,039191	0,02230175	8,14013875	67,8344896
OYACACHI	-0,05	-77,85	0,018933	0,021087	0,012168	0,034807	0,02174875	7,93829375	66,1524479
TALAG	-0,95	-78,35	0,019513	0,021702	0,006255	0,039486	0,021739	7,934735	66,1227917
CUYUJA	-0,35	-78,05	0,01445	0,017608	0,009824	0,043678	0,02139	7,80735	65,06125
PANO	-0,85	-78,35	0,018326	0,022311	0,006543	0,037589	0,02119225	7,73517125	64,4597604
LA SOFIA	0,25	-77,75	0,021103	0,020325	0,012251	0,030977	0,021164	7,72486	64,3738333
PAPALLACTA	-0,45	-78,15	0,014497	0,018298	0,007519	0,043724	0,0210095	7,6684675	63,9038958
ARCHIDONA	-0,55	-78,25	0,015516	0,019753	0,006718	0,040665	0,020663	7,541995	62,8499583
PARQUE NACIONAL COTOPAXI	-0,75	-78,35	0,017144	0,022344	0,006565	0,035399	0,020363	7,432495	61,9374583
CHACANA	-0,45	-78,25	0,013077	0,018571	0,006567	0,039147	0,0193405	7,0592825	58,8273542
PAPALLACTA	-0,35	-78,15	0,011464	0,017204	0,007172	0,040439	0,01906975	6,96045875	58,0038229
SAN MIGUEL	-1,05	-78,45	0,017027	0,019291	0,005476	0,034403	0,01904925	6,95297625	57,9414688
OYACACHI	-0,25	-78,05	0,012702	0,016243	0,010766	0,036267	0,0189945	6,9329925	57,7749375
PINTAG	-0,55	-78,35	0,013701	0,019514	0,00567	0,032929	0,0179535	6,5530275	54,6085625

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A Ño	TD (ISOCERA UNICO)
IGNACIO FLORES (PARQUE FLORES)	-0,95	-78,45	0,01523	0,018661	0,005135	0,032153	0,01779475	6,49508375	54,1256979
ALAQUES	-0,85	-78,45	0,014451	0,019657	0,005506	0,031029	0,01766075	6,44617375	53,7181146
PIFO	-0,35	-78,25	0,010397	0,017156	0,006252	0,036524	0,01758225	6,41752125	53,4793438
OLMEDO (PESILLO)	-0,05	-77,95	0,013028	0,017542	0,011402	0,028044	0,017504	6,38896	53,2413333
OYACACHI	-0,25	-78,15	0,010207	0,015776	0,008678	0,034012	0,01716825	6,26641125	52,2200938
MULALO	-0,75	-78,45	0,013687	0,019905	0,00564	0,029394	0,0171565	6,2621225	52,1843542
PINTAG	-0,45	-78,35	0,011481	0,018867	0,005634	0,031704	0,0169215	6,1763475	51,4695625
MACHACHI	-0,55	-78,45	0,011333	0,018966	0,005476	0,028263	0,0160095	5,8434675	48,6955625
SAN FCO. DE SIGSIPAMBA	0,25	-77,85	0,013265	0,016121	0,010906	0,023039	0,01583275	5,77895375	48,1579479
LAS PAMPAS	-0,45	-78,95	0,011538	0,030857	0,005119	0,015667	0,01579525	5,76526625	48,0438854
MAN. CORNEJO ASTORGA (TANDAPI)	-0,45	-78,85	0,011187	0,028535	0,005017	0,018207	0,0157365	5,7438225	47,8651875
SIGCHOS	-0,55	-78,85	0,011836	0,026431	0,004782	0,018983	0,015508	5,66042	47,1701667
MALIMPIA (LÍMITE IMBABURA Y ESM.)	0,35	-79,05	0,009706	0,040262	0,006813	0,004988	0,01544225	5,63642125	46,9701771
SIGCHOS	-0,55	-78,95	0,012032	0,028371	0,004849	0,016394	0,0154115	5,6251975	46,8766458
MALIMPIA (LÍMITE IMBABURA Y ESM.)	0,35	-79,15	0,010101	0,041101	0,006242	0,004202	0,0154115	5,6251975	46,8766458
PINTAG	-0,35	-78,35	0,009228	0,01769	0,005239	0,029488	0,01541125	5,62510625	46,8758854

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A Ño	TD (ISOCERA UNICO)
PEDRO VICENTE MALDONADO	0,25	-79,05	0,009347	0,040455	0,006396	0,005302	0,015375	5,611875	46,765625
PEDRO VICENTE MALDONADO	0,15	-78,95	0,008482	0,038491	0,006469	0,007971	0,01535325	5,60393625	46,6994688
MAN. CORNEJO ASTORGA (TANDAPI)	-0,35	-78,85	0,010332	0,028907	0,005044	0,017121	0,015351	5,603115	46,692625
ALLURIQUIN	-0,35	-78,95	0,010795	0,031031	0,005151	0,014327	0,015326	5,59399	46,6165833
RUMIPAMBA, REFUGIO PASOCHOA	-0,45	-78,45	0,009583	0,019042	0,005526	0,027114	0,01531625	5,59043125	46,5869271
PIFO	-0,25	-78,25	0,009305	0,015807	0,006166	0,029925	0,01530075	5,58477375	46,5397813
SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	0,05	-78,95	0,009366	0,03602	0,00579	0,009913	0,01527225	5,57437125	46,4530938
MAN. CORNEJO ASTORGA (TANDAPI)	-0,45	-78,75	0,010347	0,025677	0,005081	0,019815	0,01523	5,55895	46,3245833
PEDRO VICENTE MALDONADO	0,15	-79,05	0,009042	0,039491	0,005681	0,00612	0,0150835	5,5054775	45,8789792
EL CHAUPI	-0,55	-78,75	0,011031	0,023942	0,004832	0,020528	0,01508325	5,50538625	45,8782188
PUERTO QUITO	0,25	-79,15	0,009941	0,041029	0,0057	0,003655	0,01508125	5,50465625	45,8721354
SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	0,05	-78,85	0,008805	0,033459	0,005458	0,012536	0,0150645	5,4985425	45,8211875
GARCÍA MORENO	0,25	-78,95	0,008212	0,038681	0,006913	0,006448	0,0150635	5,4981775	45,8181458
PACTO	0,15	-78,85	0,007872	0,035673	0,006032	0,01024	0,01495425	5,45830125	45,4858438
LAS GOLONDRINAS	0,35	-78,95	0,00874	0,038436	0,007021	0,00558	0,01494425	5,45465125	45,4554271
MALIMPIA (LÍMITE IMBABURA Y ESM.)	0,35	-79,25	0,009934	0,040601	0,005829	0,003314	0,0149195	5,4456175	45,3801458

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A Ño	TD (ISOCERA UNICO)
MAN. CORNEJO ASTORGA (TANDAPI)	-0,35	-78,75	0,009462	0,025979	0,005048	0,018954	0,01486075	5,42417375	45,2014479
ALLLURIQUIN	-0,25	-78,85	0,00982	0,029223	0,004936	0,015098	0,01476925	5,39077625	44,9231354
MULLIQUINDIL (SANTA ANA)	-1,05	-78,55	0,012992	0,016088	0,003846	0,025603	0,01463225	5,34077125	44,5064271
SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	-0,05	-78,95	0,009287	0,033008	0,005445	0,010756	0,014624	5,33776	44,4813333
PUERTO QUITO	0,25	-79,25	0,00995	0,040782	0,005301	0,00242	0,01461325	5,33383625	44,4486354
E20, CERCA DE ALOAG	-0,45	-78,65	0,009124	0,022851	0,005113	0,021344	0,014608	5,33192	44,4326667
CAYAMBE, SARAYO	-0,05	-78,05	0,009171	0,014477	0,009509	0,025261	0,0146045	5,3306425	44,4220208
SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	-0,05	-78,85	0,008781	0,030575	0,005086	0,01364	0,0145205	5,2999825	44,1665208
VIA A NUEVA AURORA	0,05	-79,05	0,009496	0,036341	0,00489	0,007307	0,0145085	5,2956025	44,1300208
GARCÍA MORENO	0,25	-78,85	0,007504	0,035743	0,006418	0,008052	0,01442925	5,26667625	43,8889688
NANEGALITO	0,05	-78,75	0,007952	0,030058	0,005317	0,014346	0,01441825	5,26266125	43,8555104
LLOA	-0,25	-78,75	0,008973	0,02645	0,004973	0,01708	0,014369	5,244685	43,7057083
LLOA	-0,35	-78,65	0,008306	0,02319	0,004969	0,020967	0,014358	5,24067	43,67225
MACHACHI	-0,55	-78,55	0,009863	0,019622	0,004628	0,023274	0,01434675	5,23656375	43,6380313
ALOASI	-0,55	-78,65	0,009822	0,021091	0,004789	0,021571	0,01431825	5,22616125	43,5513438
ALLLURIQUIN	-0,45	-79,05	0,010421	0,030697	0,003947	0,01219	0,01431375	5,22451875	43,5376563
GUALEA	0,15	-78,75	0,007183	0,032204	0,005767	0,012026	0,014295	5,217675	43,480625
PUERTO QUITO	0,15	-79,15	0,009449	0,03934	0,004628	0,003752	0,01429225	5,21667125	43,4722604
ROSA ZARATE (QUININDÉ)	0,35	-79,35	0,009639	0,038877	0,005822	0,002804	0,0142855	5,2142075	43,4517292

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A ÑO	TD (ISOCERA UNICO)
SANGOLQUÍ	-0,35	-78,45	0,007847	0,018697	0,005144	0,025298	0,0142465	5,1999725	43,3331042
AREA NACIONAL EL BOLICHE	-0,75	-78,55	0,010996	0,018677	0,004285	0,022926	0,014221	5,190665	43,2555417
ROSA ZARATE (QUININDÉ)	0,25	-79,35	0,009874	0,039382	0,005352	0,002079	0,01417175	5,17268875	43,1057396
MACHACHI	-0,45	-78,55	0,008751	0,020284	0,004855	0,022728	0,0141545	5,1663925	43,0532708
ALAUQUES	-0,85	-78,55	0,011511	0,017694	0,003984	0,023373	0,0141405	5,1612825	43,0106875
MINDO	-0,05	-78,75	0,008004	0,027641	0,005065	0,015566	0,014069	5,135185	42,7932083
LLOA	-0,25	-78,65	0,007874	0,02376	0,004928	0,019465	0,01400675	5,11246375	42,6038646
BELISARIO QUEVEDO (GUANAILIN)	-0,95	-78,55	0,011873	0,016065	0,003583	0,023993	0,0138785	5,0656525	42,2137708
SIGCHOS	-0,55	-79,05	0,010583	0,028379	0,003738	0,012782	0,0138705	5,0627325	42,1894375
GARCÍA MORENO	0,25	-78,75	0,0071	0,03249	0,005997	0,009666	0,01381325	5,04183625	42,0153021
PIFO	-0,25	-78,35	0,008171	0,016719	0,004895	0,024904	0,01367225	4,99037125	41,5864271
MINDO, TANDAYAPA	-0,05	-78,65	0,006643	0,026182	0,005106	0,016706	0,01365925	4,98562625	41,5468854
NANEGAL	0,05	-78,65	0,006643	0,026182	0,005106	0,016706	0,01365925	4,98562625	41,5468854
QUITO, LA FLORENCIA	-0,35	-78,55	0,007853	0,020157	0,004661	0,021847	0,0136295	4,9747675	41,4563958
PUERTO QUITO	0,15	-79,25	0,009392	0,038891	0,004074	0,002058	0,01360375	4,96536875	41,3780729
RUTA SAN BERNABÉ, PEDRO V. MALD.	-0,05	-79,05	0,008862	0,033015	0,00446	0,007838	0,01354375	4,94346875	41,1955729
NANEGAL	0,15	-78,65	0,00624	0,027946	0,005372	0,014348	0,0134765	4,9189225	40,9910208
ISINLIVI	-0,75	-78,85	0,011523	0,021096	0,003492	0,017716	0,01345675	4,91171375	40,9309479

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A Ño	TD (ISOCERA UNICO)
LA UNIÓN	0,15	-79,35	0,009507	0,038188	0,004153	0,001949	0,01344925	4,90897625	40,9081354
PUERTO QUITO	0,05	-79,15	0,009803	0,036279	0,003766	0,003948	0,013449	4,908885	40,907375
CANGAHUA, ISACATA	-0,05	-78,15	0,007331	0,014235	0,007555	0,024	0,01328025	4,84729125	40,3940938
QUITO, MARISCAL DE AYACUCHO	-0,25	-78,55	0,00747	0,020259	0,004548	0,020225	0,0131255	4,7908075	39,9233958
PARAMO DE GUINTZA	-0,75	-78,75	0,01071	0,019547	0,003581	0,018597	0,01310875	4,78469375	39,8724479
QUITO, GUANGOPOLO	-0,25	-78,45	0,007318	0,018423	0,004789	0,021844	0,0130935	4,7791275	39,8260625
TANICUCHI	-0,75	-78,65	0,009996	0,018158	0,003782	0,019885	0,01295525	4,72866625	39,4055521
CHALGUAYACU	0,25	-78,65	0,006095	0,027962	0,005379	0,011895	0,01283275	4,68395375	39,0329479
PUERTO QUITO	0,05	-79,25	0,009907	0,035903	0,003184	0,002019	0,01275325	4,65493625	38,7911354
PUERTO QUITO	0,05	-79,35	0,010045	0,035735	0,003265	0,001965	0,0127525	4,6546625	38,7888542
ILILAGUA, PARROQUIA NONO	-0,05	-78,55	0,006302	0,020435	0,004504	0,018743	0,012496	4,56104	38,0086667
VALLE HERMOSO	-0,05	-79,15	0,009079	0,032691	0,003196	0,004207	0,01229325	4,48703625	37,3919688
CALACALI	0,05	-78,55	0,005955	0,02137	0,004459	0,017369	0,01228825	4,48521125	37,3767604
SAN FCO. DE SIGSIPAMBA	0,25	-77,95	0,008737	0,012684	0,01	0,017317	0,0121845	4,4473425	37,0611875
CHANTILIN	-0,85	-78,65	0,010047	0,016535	0,003274	0,018595	0,01211275	4,42115375	36,8429479
QUITO, POMASQUI	-0,05	-78,45	0,005965	0,018074	0,004527	0,01961	0,012044	4,39606	36,6338333
SANTA ROSA DE CUZUBAMBA	-0,05	-78,25	0,006765	0,01429	0,004979	0,021748	0,0119455	4,3601075	36,3342292
CALACALI	0,15	-78,55	0,005649	0,022206	0,004706	0,014984	0,01188625	4,33848125	36,1540104
GUAYLLABAMBA	-0,05	-78,35	0,006303	0,01535	0,004451	0,020895	0,01174975	4,28865875	35,7388229

SECTOR	LATI TUD	LONG ITUD	DJF ISR FLAHES KM2	MAM ISR FLAHES KM2	JJA ISR FLAHES KM2	SON ISR FLAHES KM2	PROMEDI O	DESCARG AS*KM2*A Ño	TD (ISOCERA UNICO)
VIA E20 CERCA DE PLAN PILOTO	-0,05	-79,35	0,009323	0,032135	0,00251	0,001456	0,011356	4,14494	34,5411667
SAN ANTONIO, AV. HUASIPUNGO	0,05	-78,45	0,005393	0,018452	0,00423	0,017297	0,011343	4,140195	34,501625
SELVA ALEGRE	0,25	-78,55	0,00545	0,02225	0,004528	0,01258	0,011202	4,08873	34,07275
PUJILI	-1,05	-78,65	0,010614	0,0133	0,002628	0,017953	0,01112375	4,06016875	33,8347396
ELOY ALFARO (SAN FELIPE)	-0,95	-78,65	0,010075	0,013837	0,002609	0,017937	0,0111145	4,0567925	33,8066042
SAN JOSE DE MINAS	0,15	-78,45	0,005152	0,01891	0,004423	0,015039	0,010881	3,971565	33,096375
VALLE HERMOSO	-0,05	-79,25	0,009098	0,030277	0,002113	0,001884	0,010843	3,957695	32,9807917
VIA GUAYLLABAMBA- TABACUNDO	0,05	-78,25	0,005873	0,01362	0,004709	0,018641	0,01071075	3,90942375	32,5785313
MALCHINGUI	0,05	-78,35	0,005365	0,014888	0,004157	0,017901	0,01057775	3,86087875	32,1739896
SELVA ALEGRE	0,25	-78,45	0,005009	0,018509	0,0038	0,012462	0,009945	3,629925	30,249375
ANGOCHAGUA	0,25	-78,05	0,005957	0,010153	0,008049	0,014755	0,0097285	3,5509025	29,5908542
ATAHUALPA (HABASPAMBA)	0,15	-78,35	0,004735	0,014707	0,004051	0,015357	0,0097125	3,5450625	29,5421875
SAN RAFAEL	0,15	-78,25	0,004783	0,012455	0,004483	0,015887	0,009402	3,43173	28,59775
LA ESPERANZA	0,25	-78,15	0,004626	0,009903	0,006167	0,013964	0,008665	3,162725	26,3560417
SAN JOSE DE QUICHINCHE	0,25	-78,35	0,004183	0,013524	0,003401	0,012691	0,00844975	3,08415875	25,7013229
CARR. PANAMERICANA, OTAVALO	0,25	-78,25	0,004281	0,010686	0,00379	0,013276	0,00800825	2,92301125	24,3584271

Tabla 9. Puntos obtenidos con sector, latitud y longitud, y los valores de (descargas/km2-año) y nivel isoceraúnico, (Número anual de días con tormenta eléctrica).

Para poder sacar los valores se ocupó una herramienta de ArcGIS llamada Spatial Analysis Tools en donde hay una función de Interpolación llamada IDW (Inverse Distance Weighting) en donde se estima de forma matemática (determinística) asumiendo que los valores que tengamos por ejemplo de GFD más cercanos en distancia son más acordes que los valores de puntos más lejanos.

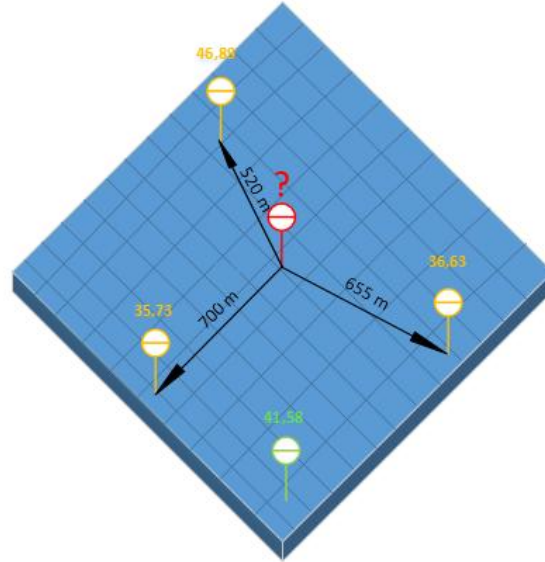


Figura 13. Búsqueda de un valor mediante puntos cercanos.

La fórmula aplicada es la siguiente, para cada punto:

$$GFD = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{GFD_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (10)$$

Dónde: GFD_i: Ground Flash Density (Descargas/ km^2 - año) en el punto i.

d_i : Distancia en metros desde el punto i, hasta el punto donde se quiere sacar el GFD.

p: parámetro de potencia de ArcGIS en donde 1 muestra la superficie interpolada suavizada y 2 aumenta la influencia que tienen los valores conocidos a nivel general.

Se siguen sumando los puntos que van a ser interpolados, es decir los valores de GFD y posteriormente de Td, en cada punto respecto a la distancia, usando una autocorrelación espacial que básicamente lo que indica es cuál punto es similar a otro cercano, de esta forma

se pueden ir uniendo los valores similares dentro del mapa y sacando rangos que ayuden a zonificar áreas.

En la base de datos de LIS viene solamente el valor de GFD, por lo que para sacar el valor de Td se hizo una aproximación utilizando la fórmula del apartado 4.1, donde un despeje simple nos lleva al valor ceraúnico que es el presentado en las tablas.

El área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito se la vio en el Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano ya que en las normas para sistemas de distribución parte A de la EEQ se encuentra muy desactualizado, el único mapa oficial que se encuentra en la red es este, que fue publicado en el año 2014. Se realizó un layer para ArcGIS .shp con el contorno del área de concesión, para posteriormente ir agregándole los datos sacados del satélite, en donde se implementó también una grilla de referencia para ver la ubicación y geolocalización. Donde la escala del mapa es: 1:350.000

CARDINAL	SECTOR	LATITUD	LONGITUD	DESCARGAS*KM2*A Ño	TD (ISOCERAUNICO)
NORTE	PARROQUIA NONO	-0,05	-78,55	4,56104	38,00866667
NORTE	POMASQUI	-0,05	-78,45	4,39606	36,63383333
NORTE	GUAYLLABAMBA	-0,05	-78,35	4,28865875	35,73882292
NORTE	PLAN TECHO	-0,1	-78,55	4,8183	40,1525
NORTE	URB. PRADOS DEL CONDADO	-0,1	-78,5	4,6318	38,59833333
NORTE	CARAPUNGO	-0,1	-78,45	4,6577	38,81416667
NORTE	CALDERON	-0,1	-78,4	4,6136	38,44666667
NORTE	TABABELA	-0,1	-78,35	4,806	40,05
NORTE	CUMBRE RUCU PICHINCHA	-0,15	-78,55	4,8183	40,1525
NORTE	SAN CARLOS	-0,15	-78,5	4,6318	38,59833333
NORTE	JIPIJAPA	-0,15	-78,45	4,6577	38,81416667
NORTE	COCOTOG	-0,15	-78,4	4,6136	38,44666667
NORTE	TABABELA	-0,15	-78,35	4,806	40,05
CENTRO N	SAN JUAN	-0,2	-78,55	4,8183	40,1525
CENTRO N	UNIVERSIDAD CENTRAL	-0,2	-78,5	4,6318	38,59833333
VALLE	CUMBAYA	-0,2	-78,45	4,6577	38,81416667
VALLE	TUMBACO	-0,2	-78,4	4,6136	38,44666667
VALLE	PUEMBO	-0,2	-78,35	4,806	40,05
SUR	MARISCAL DE AYACUCHO	-0,25	-78,55	4,7908075	39,92339583
SUR	PUENGASI	-0,25	-78,5	4,783	39,85833333
SUR	GUANGOPOLO	-0,25	-78,45	4,7791275	39,8260625
VALLE	TUMBACO	-0,25	-78,4	4,8774	40,645
SUR	PIFO	-0,25	-78,35	4,99037125	41,58642708
SUR	QUITUMBE	-0,3	-78,55	5,0831	42,35916667
SUR	CONOCOTO	-0,3	-78,5	4,9362	41,135

CARDINAL	SECTOR	LATITUD	LONGITUD	DESCARGAS*KM2*A ÑO	TD (ISOCERAUNICO)
SUR	ARMENIA - SAN RAFAEL	-0,3	-78,45	5,0953	42,46083333
SUR	LA MERCED - ALANGASI	-0,3	-78,4	5,1486	42,905
SUR	PIFO	-0,3	-78,35	5,6544	47,12
SUR	SAN JUAN DE TURUBAMBA	-0,35	-78,55	4,9747675	41,45639583
SUR	AMAGUAÑA	-0,35	-78,5	5,0817	42,3475
SUR	SANGOLQUÍ	-0,35	-78,45	5,1999725	43,33310417
SUR	SAN FCO. DE ALPAHUMA	-0,35	-78,4	5,3841	44,8675
SUR	PINTAG	-0,35	-78,35	5,62510625	46,87588542

Tabla 10. Nivel ceráunico y densidad de descargas atmosféricas dentro de la ciudad de Quito

Los valores marcados son dados directamente por los datos del satélite LIS, mientras que los restantes fueron calculados con la aplicación de Matlab.

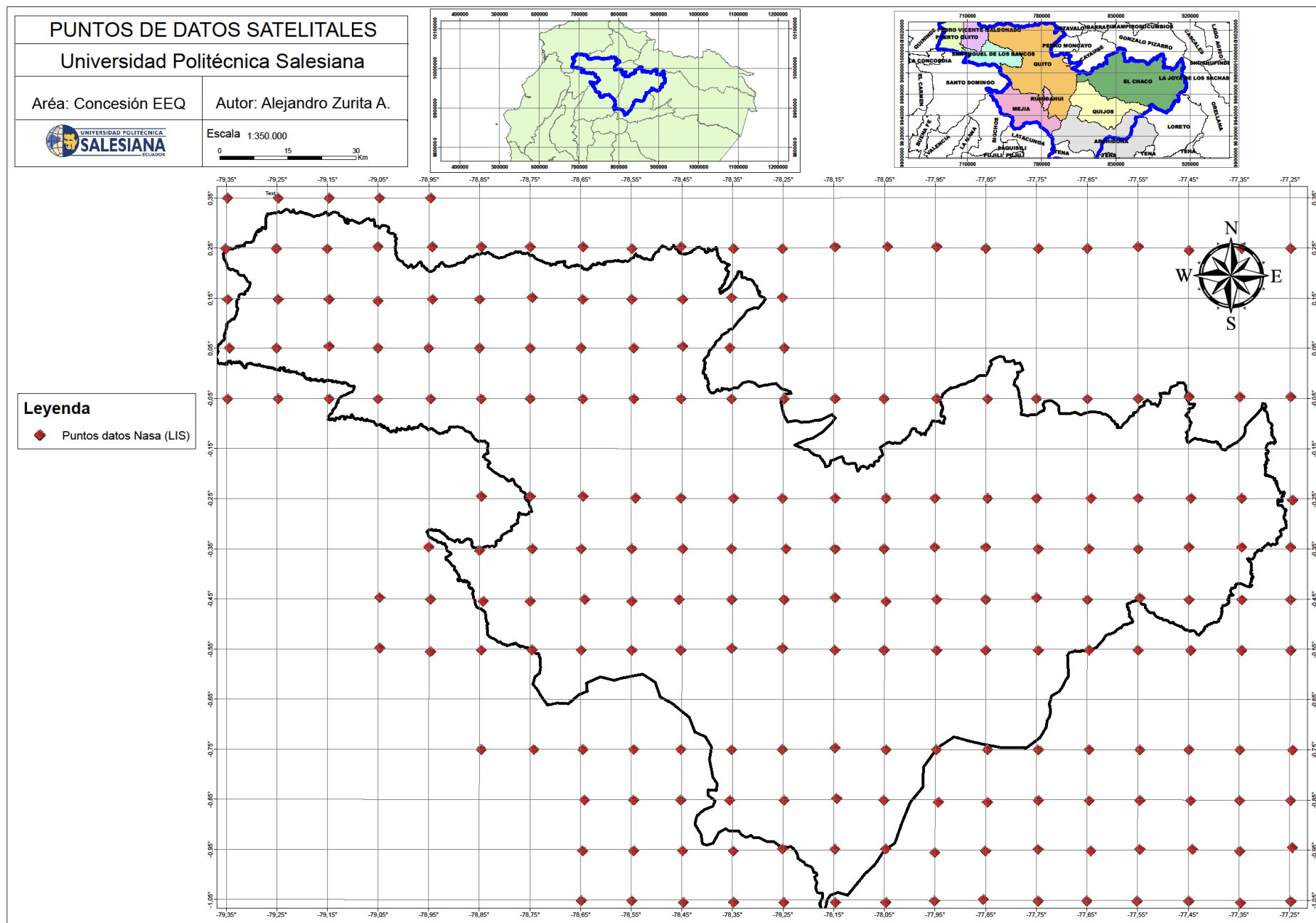


Figura 14. Área de concesión EEQ, con grilla de puntos para extraer los datos disponibles del satélite LIS.

Las fechas en las que se produce mayormente tormentas eléctricas, se las puede sacar con los datos separados por trimestres como se explicó en la Tabla 4. Para lo cual nos da el siguiente gráfico.

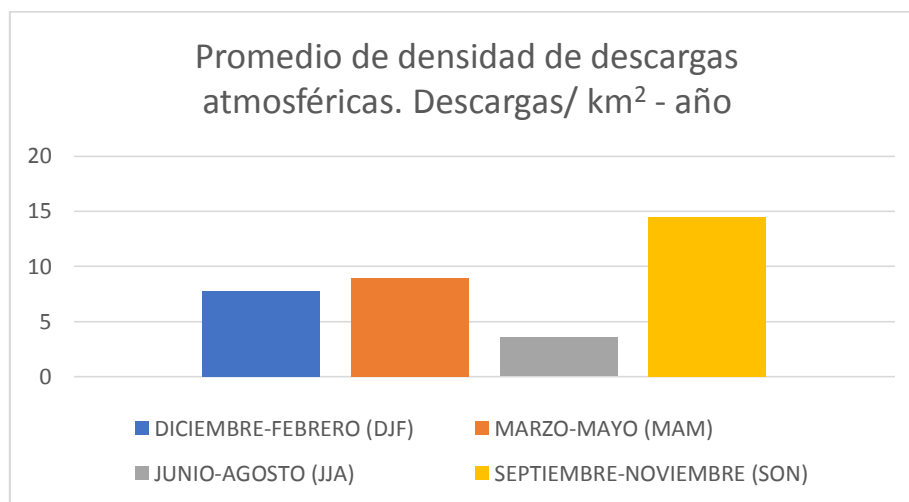


Figura 15. Densidad de descargas atmosféricas separado por trimestres.

Como podemos observar de la **Figura 15**, dentro del área de concesión de la EEQ existe un mayor número de descargas atmosféricas y por tanto de días con tormenta en los meses de septiembre a noviembre, seguido por la época de marzo a mayo, posteriormente de diciembre a febrero y por último de junio a agosto. En Ecuador solo tenemos la temporada seca y la temporada lluviosa, no tenemos estaciones del clima. Muchas veces se cree que, por ser temporada seca, no va a llover nunca, pero esto no es cierto ya que también hay presencia de lluvias y en este caso tormentas eléctricas, pero en una menor cantidad, como es el caso de junio a agosto.

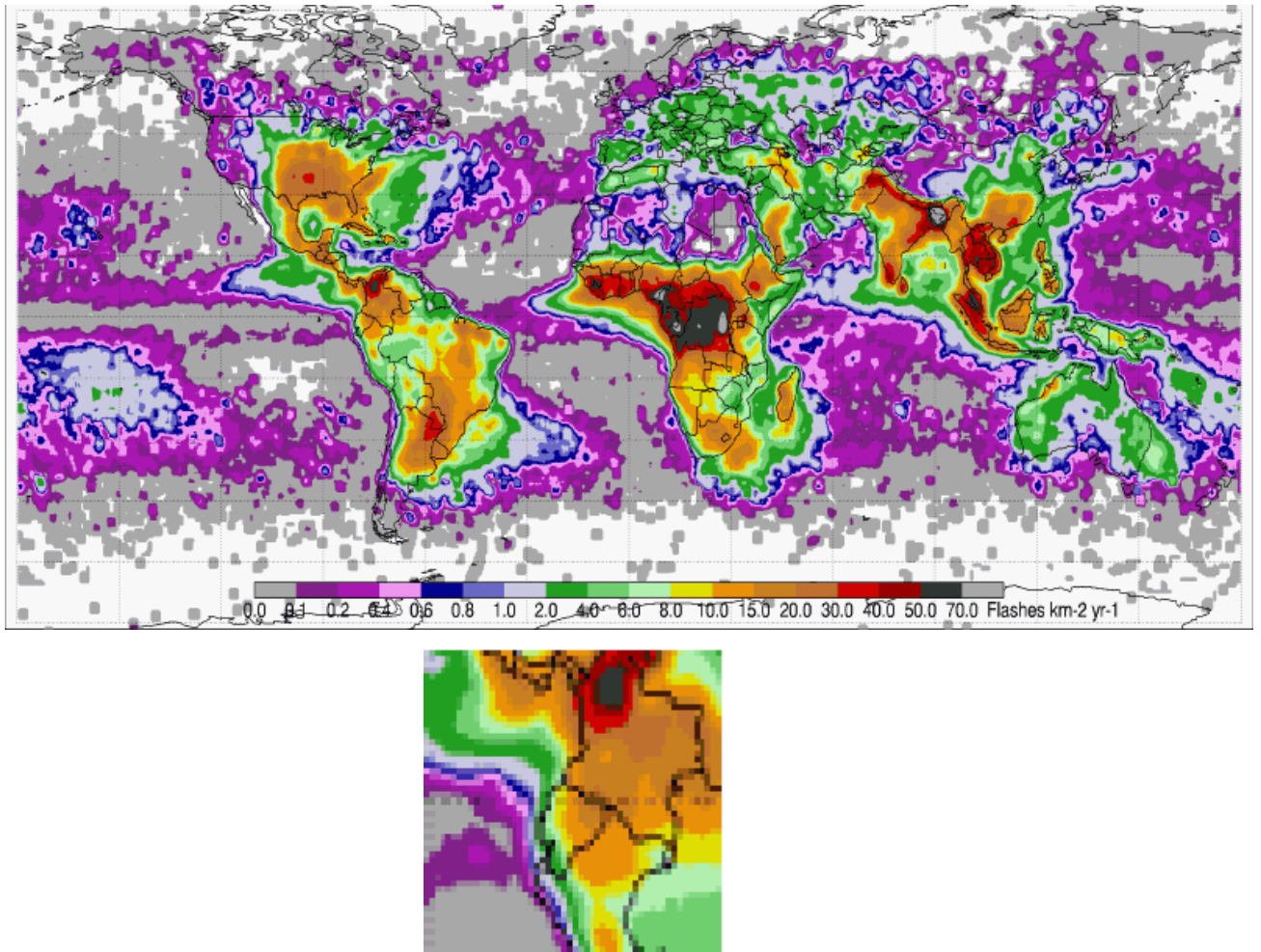


Figura 16. LRFC tasa de descargas atmosféricas media anual de LIS y OTD combinados, rejilla de 2.5 °. Con un zoom hacia la parte de Ecuador. Fuente: [30]

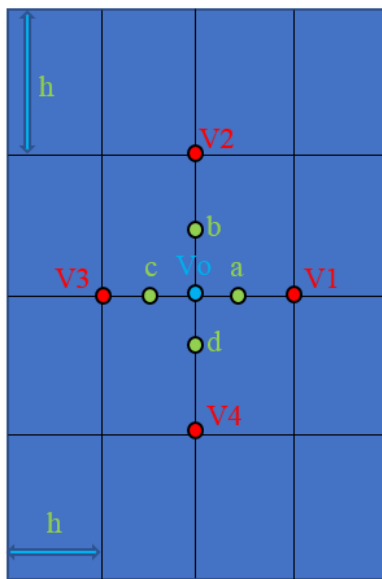
Para validar los datos de la Tabla 9, se consultó algunas referencias, entre ellas la referencia [25], en este mapa, se puede observar que aproximadamente en el área de concesión de la EEQ los valores están acorde a los obtenidos en esta investigación, es decir la leyenda de colores indica que los datos de densidad de rayos a tierra, podría variar desde un 4 descargas/km²-año y 10 descargas/km²-año hasta un máximo de 20 descargas/km²-año hacia la parte del oriente. En el apartado, resultados se observará en el mapa creado que los valores están dentro de los límites y magnitudes esperadas.

5.2 Programación en el software Matlab

Para implementar la programación, primero se buscó una base de datos confiable en la que se pueda basar la aplicación. Primeramente, lo que se hizo fue acudir hacia el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en donde se solicitó los datos de las estaciones meteorológicas. Estas, tienen datos sobre viento, humedad relativa, radiación, pero no de descargas atmosféricas. Por esta razón, se mantuvo conversaciones personalmente con varios ingenieros encargados, del área de pronóstico y atención al usuario, pero todos llegaron a la misma conclusión, no existen datos digitalizados sobre descargas atmosféricas ya que el país no cuenta con sensores que puedan medir este fenómeno en ninguna estación meteorológica. Esto muestra por qué el país no puede realizar investigaciones constantes sobre las descargas atmosféricas, y por esto, no puede avanzar como otros países respecto a esta área de investigación. En las estaciones meteorológicas, una persona anota si escucha caer un rayo, en hojas de registro, pero estas, no se digitalizan y quedan sin efecto, porque no hay forma de sacar conclusiones en datos dispersos y que solo consten en hojas, estos históricos deberían estar en una base de datos. Como se puede ver, es un método anticuado el de escuchar las descargas atmosféricas y anotar, ya que puede estar sujeto a muchísimos errores y variables, pero sería la única manera de al menos tener un registro sin la instrumentación necesaria. En la actualidad se tienen poderosas herramientas como sensores de descargas atmosféricas, que se espera se implementen pronto. Lo mismo sucedió con la Secretaría del Ambiente ya que esta institución, tiene de igual forma ciertas estaciones meteorológicas. Se indicó que hay bases de datos en su página virtual, pero de igual forma que no se tiene información sobre descargas atmosféricas. Es por esta razón, que, al no poder obtener datos por parte de las instituciones nacionales, se recurrió a datos satelitales que están a disposición de investigadores en páginas como la de Global Hydrology Resource Center (GHRC) de la NASA. Se contactó directamente con esta institución vía e-mail, en donde se solicitó sugerencias sobre las bases de datos que se puedan ocupar, ya que se necesitaba de una con una resolución muy alta ya que el área de concesión de la EEQ es pequeña en extensión. Se llegó a la conclusión que la mejor base de datos para este cometido es la de la referencia [26].

Los datos extraídos se encontraban en formato .nc (netCDF) y .gz (Gnu archivos comprimidos). Este tipo de formato netCDF, es un formato especial en el cual se encuentran

Para la realización del programa se importaron los datos desde Excel hacia Matlab, en donde se utilizó la técnica de resolución de la ecuación de Laplace por iteración numérica, normalmente usada en teoría electromagnética. El método en el que se llega a la ecuación (11), es proporcionado por la referencia [27]. Lo que nos indica esta técnica es una aproximación al punto deseado mediante las condiciones de borde, con la ecuación de Laplace en dos dimensiones. De la siguiente manera:



Al despejar V_0 se obtiene:

$$V_0 = \frac{1}{4} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad (11)$$

En el caso de esta investigación no se busca un punto de potencial, pero, se utiliza el mismo método para buscar un punto que cumple con las mismas condiciones de inicio, con una grilla de separación h y los datos de las condiciones de borde. En el programa de Matlab se busca aplicar este algoritmo, hacer un promedio de los cuatro puntos más cercanos a las coordenadas que se desee. El programa fue pensado para ser una aplicación que corra como un ejecutable (.exe) es decir, que no se tengan que modificar líneas de programación si no que el usuario lo ocupe directamente. Se utiliza las ventanas interactivas del GUI de Matlab, en donde el usuario pueda ingresar por teclado el valor de latitud y longitud en decimales, y la respuesta del programa sea el nivel cerámico y las descargas de rayos a tierra, o si se tienen coordenadas UTM se agrega un conversor de coordenadas UTM a coordenadas geográficas decimales dentro del mismo programa. Para cumplir con esto se siguió una serie de pasos que se detallarán a continuación:

Primeramente, se debe determinar si el valor donde se requiere el dato está dentro del área de concesión, para esto se plantean dos vectores de ubicación, uno de longitud y otro de latitud, que, al encontrarse en coordenadas geográficas en su forma decimal, facilita una lógica que determine si un número ingresado se encuentra o no dentro del rango del área de concesión de la EEQ. O si no lo está, que imprima un error por medio del comando “errordlg”. El mismo proceso se tiene que cumplir tanto para la longitud como para la latitud. Además de otro control de errores que es el comando “isnan” que si se ingresa valores que no sean numéricos, imprima un error con el mismo comando “errordlg”.

Posteriormente, si se confirma que el lugar donde se desea el dato está dentro de las coordenadas del área de concesión, y el valor es numérico, se procede con el programa.

Se debe determinar cuáles son los puntos en los que se tiene datos del sensor satelital LIS que están más cerca de la coordenada ingresada por el usuario, tanto en latitud y en longitud para formar un cuadrado y aplicar el algoritmo de promedio visto anteriormente. Para esto se aplica un lazo de repetición que se repetirá el número de veces que sea el número de datos, es decir para este caso son 208 datos en cada vector, ya que son 208 puntos utilizados que coinciden con el área de concesión de la EEQ. (Ver **Figura 15**).

Se hace una aproximación por medio de un ordenamiento de vectores, esto se logra mediante un comando condicional, que sigue el método de la **Figura 18**, y la estructura de flujograma de la **Figura 19**, en donde, se agrupa los valores mayores y los valores menores de cada uno de los datos ingresados, es decir, se hacen 4 comparaciones, por ejemplo, para la longitud, si de todos los datos del vector de 208 espacios alguno cumple con que es *menor* al valor ingresado de longitud se guarda en un vector, de igual forma, si alguno de los 208 datos de longitud cumple con que es *mayor* al valor ingresado de longitud se guarda en otro vector diferente. Para lo cual nos quedaría algo como la siguiente tabla:

	Vector con datos mayores al ingresado	Vector con datos menores al ingresado
Longitud	veclngmay	veclngmen
Latitud	veclatmay	veclatmen

Tabla 11. Nombre de las variables de los vectores de latitud y de longitud mayores o menores al dato ingresado.

En todos estos casos, siguiendo con el ejemplo anterior, se tomó los datos menores y se colocó en un vector, el problema es que los que son mayores en ese mismo vector los deja colocando un valor de 0. Por lo que si estamos haciendo nuestro programa con coordenadas que son negativas, siempre el número más alto del vector menor iba a ser 0. Para evitar este problema se colocó un condicional que si el elemento es mayor (en el vector de menores) no ponga un valor de 0 si no un valor mucho menor que los datos, por ejemplo, un valor de -10000. De esta forma al sacar el máximo del vector menor, sería la coordenada más próxima a la ingresada por el usuario. La misma lógica se aplica para el vector de mayores, condicionando que, en los 208 datos, para los números que sean menores en vez de colocar el valor de 0, se coloque un valor muy alto, como de 10000. En este caso se debe sacar el valor mínimo del vector mayor, de esta forma tendremos las coordenadas más próximas tanto en latitud y longitud para formar un cuadrado y aplicar el promedio de los cuatro puntos.

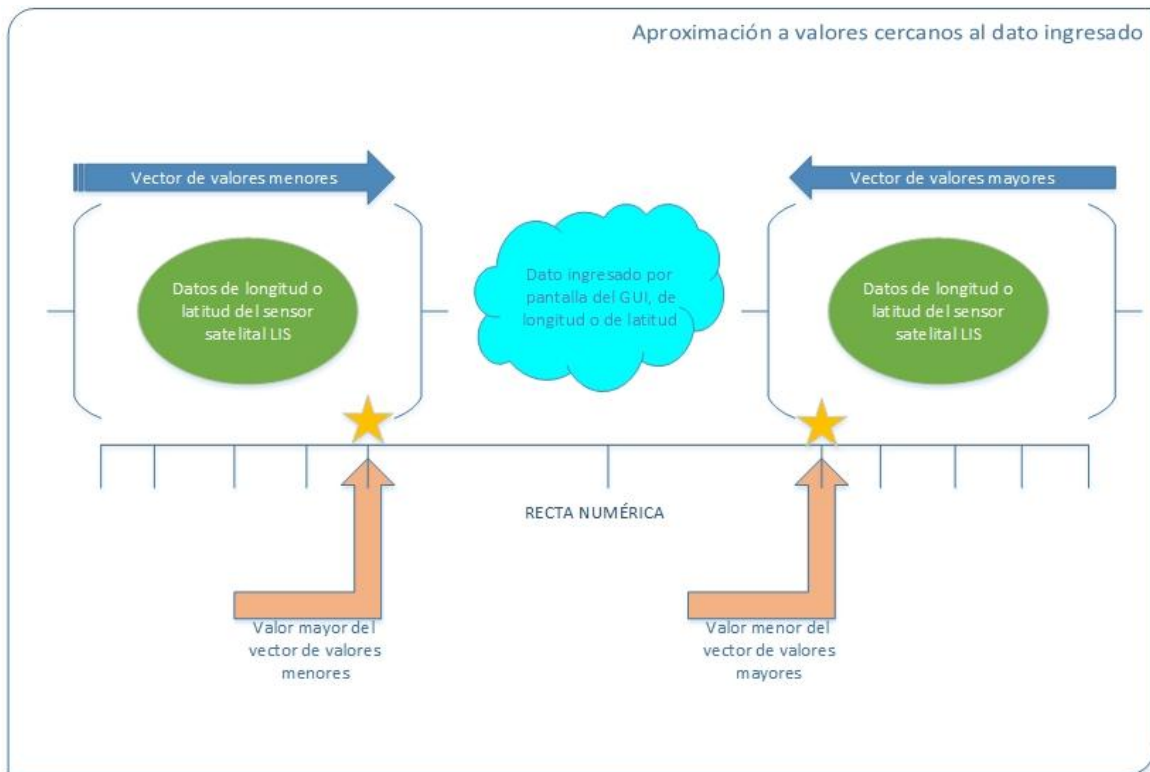


Figura 18. Aproximación a valores cercanos de latitud y longitud al dato ingresado por pantalla del GUI, Matlab.

Lo que se necesita es el dato de nivel cerámico y descargas de rayos a tierra en un punto cartesiano $(x;y)$ o (longitud; latitud). Entonces se ocupa otro “for” en donde se condiciona para que de la posición en el vector de 208 datos de donde se está la variable encontrada de menor latitud y mayor latitud; así también como de menor longitud y mayor longitud.

Es lógico que si estamos hablando de que para poder formar una línea entre dos puntos cartesianos $P(x;y)$ se cumple lo siguiente: Para una línea de longitud, (eje x), se mantiene constante la coordenada en Y y la coordenada en X varía. Mientras que, para una línea de latitud, (eje y), se mantiene constante la coordenada en X y la coordenada en Y es la que varía. De esta forma debemos evaluar los puntos que resultaron más cercanos al deseado para finalmente, obtener 4 puntos $P(x;y)$, siendo estas las coordenadas de las condiciones de frontera, para una ilustración se puede observar la **Figura 18**.

Una vez teniendo las coordenadas, se realiza la consulta a Matlab de los valores de nivel cerámico y densidad de rayos a tierra en esos puntos específicos.

Finalmente, se ocupa el algoritmo de la referencia [27] en donde nos indica que un valor aproximado en el punto será el promedio de estos 4.

Se manda a imprimir estos valores en unos cuadros de texto no editables, toda la programación se encuentra dentro del “Callback” del botón “Aceptar”, en el Anexo 1, se puede encontrar el código completo de Matlab.

Mientras que, el pseudocódigo para que el programa pueda ser implementado por otras personas, se encuentra en la **Figura. 19** y **Figura. 20**.

Además, en la aplicación, existe un botón el cual lleva a una pantalla, en donde se hace la conversión de coordenadas UTM, a coordenadas geográficas decimales. Esto se debe a que en algunos GPS las coordenadas se encuentran referenciadas a una proyección UTM (valores en metros). En donde, el más utilizado es el elipsoide WGS-84, (Sistema Geodésico Mundial 1984), además es el sistema de referencia que se utiliza en el sistema ArcGIS de la página web de la EEQ.

Para este elipsoide WGS-84, se definen algunos parámetros, para lograr una proyección, desglosando de cierta forma al planeta Tierra, para ser más precisos, en 60 zonas o también llamados husos.

Semieje mayor = 6378137 m (elipse a)

Semieje menor=6356752.314245m (elipse b)

Excentricidad:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = 0.08181919 \quad (12)$$

Segunda excentricidad:

$$e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b} = 0.082094438 \quad (13)$$

Cuadrado de la segunda excentricidad:

$$(e')^2 = 0.006739496 \quad (14)$$

Radio polar de curvatura:

$$c = \frac{a^2}{b^2} = 6399593.626 \quad (15)$$

Factor de corrección:

$$fc = 0.9996 \quad (16)$$

En este caso al tratarse del área de concesión de la EEQ se deja como constante el Huso = 17 Hemisferio: Sur. Es por esta razón que el programa está parametrizado para que cualquier valor de UTMX o UTMY fuera del área de concesión salte la ventana de error.

Al estar en el hemisferio sur se tiene que corregir los parámetros de coordenadas del denominado falso norte. A la variable corregida en la coordenada Y se la llamará “sur”.

$$sur = UTM Y - 10000000 \quad (17)$$

Continuando con los cálculos:

$$Meririano = 6 * Huso - 183 \quad (18)$$

$$Fi = \frac{sur}{(6366197.724 * 0.9996)} \quad (19)$$

$$Ni = \frac{c}{(1 + (e')^2 * \cos(Fi))^{1/2} * 0.9996} \quad (20)$$

$$a = \frac{UTMX - 500000}{Ni} \quad (21)$$

$$a1 = \sin(2 * Fi) \quad (22)$$

$$a2 = a1 * (\cos(Fi))^2 \quad (23)$$

$$j2 = Fi * \frac{a1}{2} \quad (24)$$

$$j4 = \frac{3 * j2 + a2}{4} \quad (25)$$

$$j6 = \frac{5 * j4 + a2 * (\cos(Fi))^2}{3} \quad (26)$$

$$\alpha = \frac{3}{4} * (e')^2 \quad (27)$$

$$\beta = \frac{5}{3} * \alpha^2 \quad (28)$$

$$\gamma = \frac{35}{27} * \alpha^3 \quad (29)$$

$$Bi = 0.9996 * c * (Fi - \alpha * j2 + \beta * j4 - \gamma * j6) \quad (30)$$

$$b = \frac{\gamma - \beta i}{Ni} \quad (31)$$

$$Zeta = \frac{(e')^2 * a^2}{2} * (\cos(Fi))^2 \quad (32)$$

$$xi = a * \left(1 - \frac{\gamma - Zeta}{3}\right) \quad (33)$$

$$Eta = b * (1 - Zeta) + Fi \quad (34)$$

$$senhxi = \frac{e^{xi} - e^{-xi}}{2} \quad (35)$$

$$\Delta\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{\sin hxi}{\cos(Eta)}\right) \quad (36)$$

$$Tau = \tan^{-1}(\cos(\Delta\lambda) * \tan(Eta)) \quad (37)$$

$$Firad = Fi + \left(1 + (e')^2 * (\cos(Fi))^2 - \frac{3}{2} * (e')^2 \sin(Fi) * \cos(Fi) * (Tau - Fi)\right) ... \\ * (Tau - Fi) \quad (38)$$

Para finalmente obtener las coordenadas geográficas decimales, tanto en el eje x como en el eje y:

$$Coordx = \frac{\Delta\lambda}{\pi} * 180 + Meririano \quad (39)$$

$$Coordy = \frac{Firad}{\pi} * 180 \quad (40)$$

Como se observó en las anteriores ecuaciones, lo que se intenta es sincronizar los dos sistemas de ubicación geográfica, aproximando con distintos cálculos que son de autoría de la referencia [28], y recopilados en algunas publicaciones, como la referencia [29].

Primeramente, al seguir el flujograma de la **Figura 21**, se tiene el ingreso de las coordenadas UTMX y UTMY, al ingresar estos datos, el programa aplica las ecuaciones de la (12) a la (40) en el mismo orden. Y finalmente imprime en pantalla los resultados obtenidos. Este proceso es muy rápido y el resultado es el dato de coordenadas geográficas. De esta forma se ayuda al usuario a que, si no posee conexión a internet, pueda de igual forma utilizar el programa y realizar la conversión. Además, el usuario no tendrá que salir de la pantalla de la aplicación para buscar en otro sitio como convertir las coordenadas UTM que tiene en su GPS a coordenadas geográficas.

Sin embargo, el programa fue realizado principalmente en coordenadas geográficas y no en UTM ya que ayuda a una mejor ubicación al usuario en la grilla. Por ejemplo, para una coordenada P(x;y), dentro del área de concesión de la EEQ (-78,48; -0,17) se encuentra por el sector de la Av. Gaspar de Villaroel. Si nos dicen tales coordenadas geográficas, el usuario se imagina un mapa cartesiano, y se ubica más o menos por qué zona del mapa se encuentra el dato. Pero si se menciona esta misma ubicación en coordenadas UTM, en el mismo punto P(x;y), sería: (780502,7395; 9981191,58) . Al leer el usuario esta coordenada UTM, no se tiene una idea clara de la zona en la que se encuentra este dato. Para el cerebro es más difícil idearse cantidades muy grandes, por lo que se decidió hacer el algoritmo principal aceptando coordenadas geográficas decimales, pero de igual forma con un conversor a coordenadas UTM. De esta forma se logra una buena comprensión del usuario a la aplicación y además una compatibilidad con las coordenadas que marca el GPS. El programa completo de Matlab de esta pantalla, se encuentra en el Anexo 2. Mientras que, el flujograma para que pueda ser implementado por otra persona, se encuentra en la **Figura 21**.

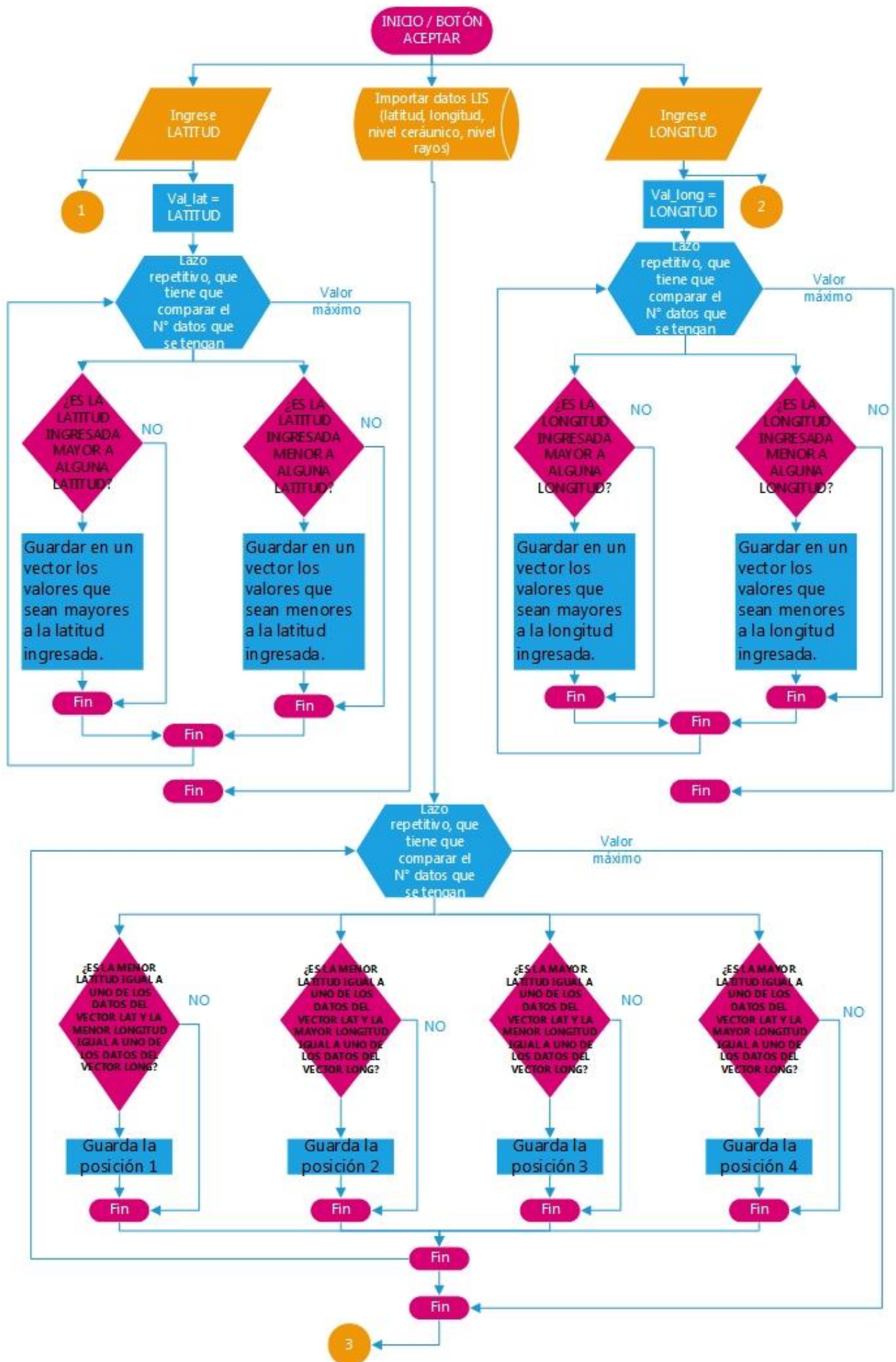


Figura 19. Flujograma implementado para la aplicación hecha en Matlab (Parte1).

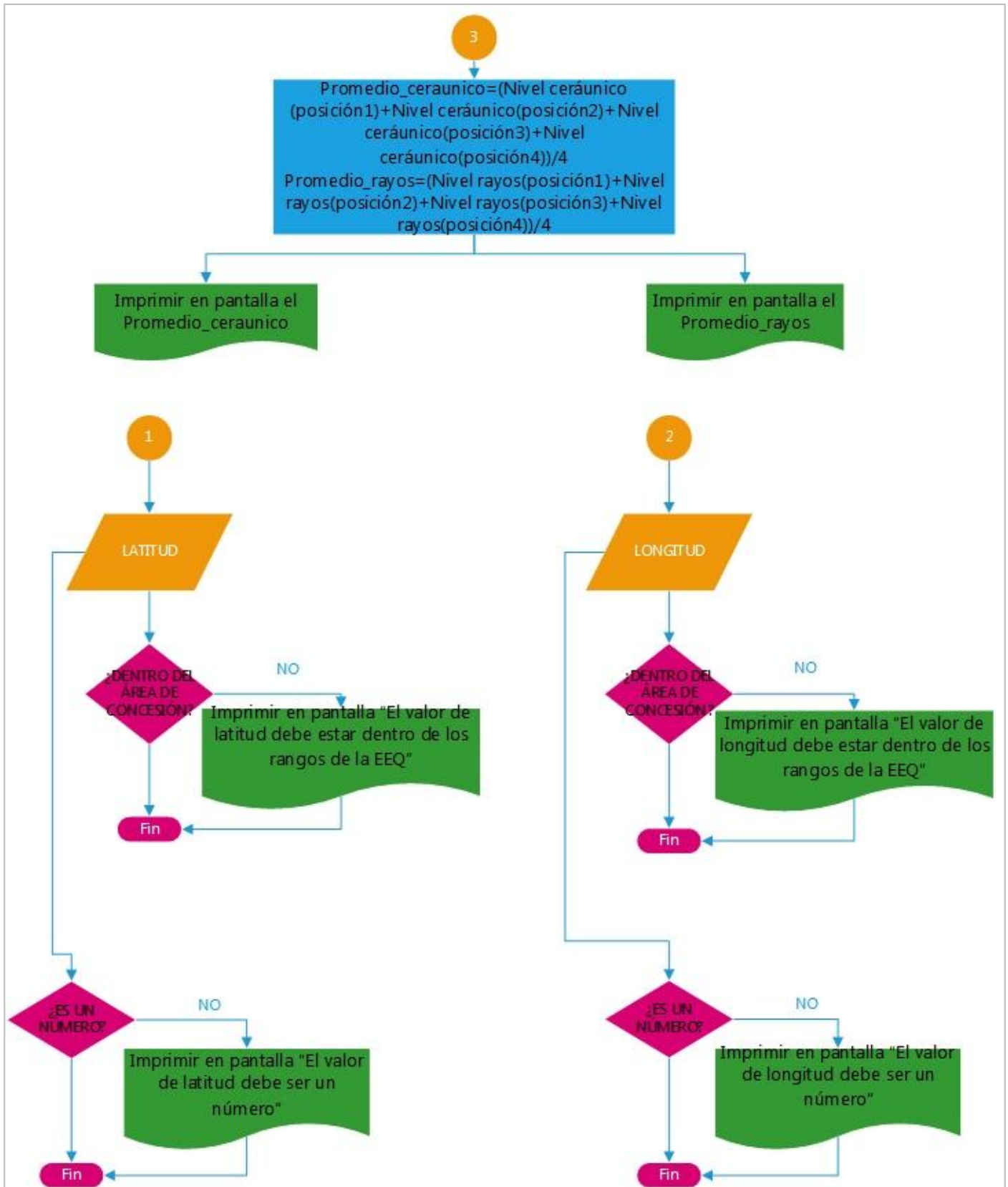


Figura 20. Flujograma implementado para la aplicación hecha en Matlab (Parte2), control de errores.

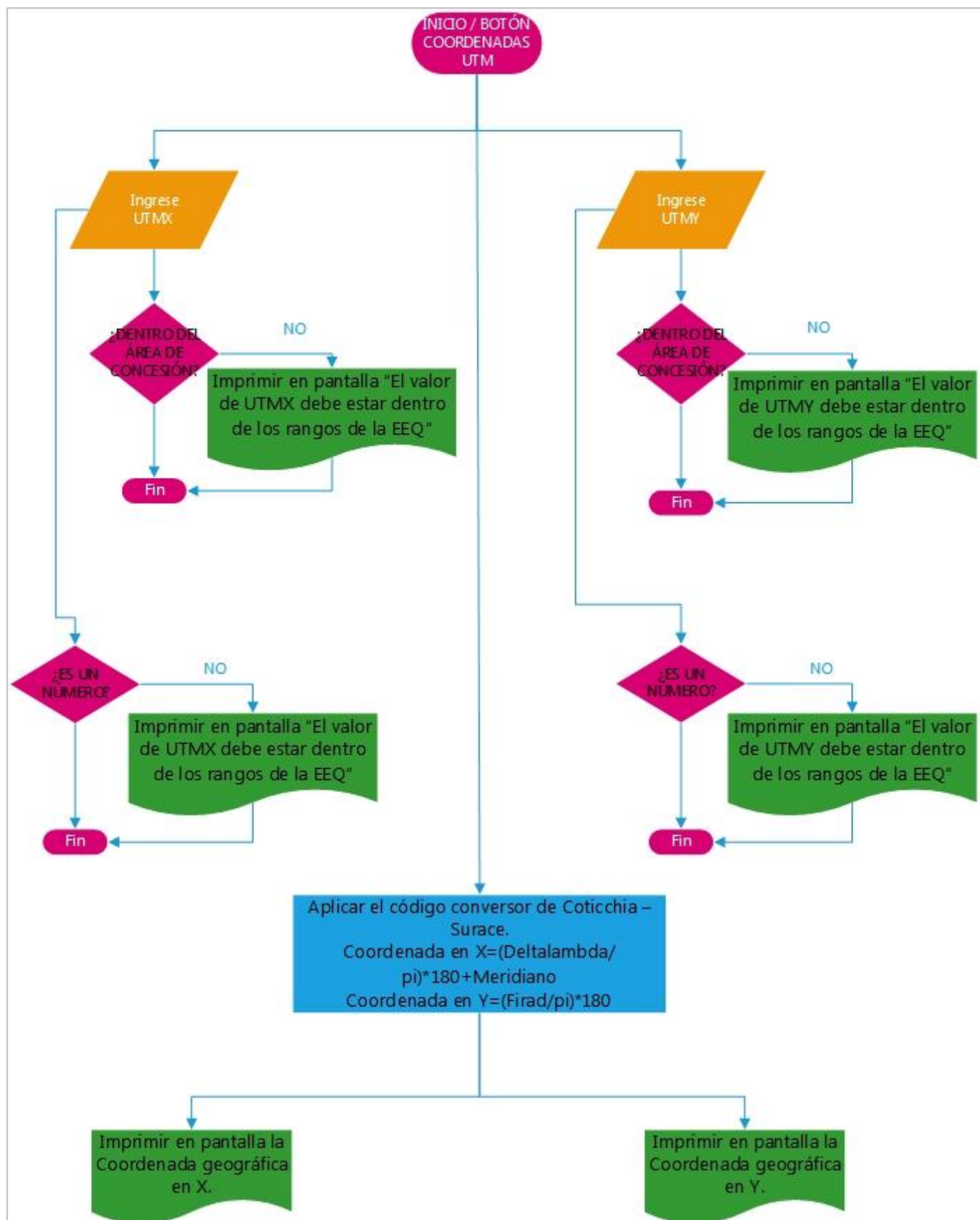


Figura 21. Flujograma implementado para la conversión de coordenadas UTM a coordenadas geográficas decimales, y control de errores.

RESULTADOS

Se logró cumplir los objetivos de crear un programa que sea de fácil uso para el usuario, que corre como una aplicación ejecutable. En donde al ingresar las coordenadas que se encuentren dentro del área de concesión de la EEQ la aplicación imprime el nivel cerámico y la densidad de rayos a tierra. Si el usuario posee coordenadas UTM, puede dirigirse a la pantalla “Coordenadas UTM” y se realizará la conversión respectiva. El botón INFO despliega un manual de usuario, el de “Limpiar”, limpia todas las casillas para una nueva consulta y el botón “Mapas” lleva al usuario a los mapas isócerámico y de descargas a tierra en formato PDF. Para que se pueda ubicar con la grilla allí colocada.



Figura 22. Ventana principal del programa.



Figura 23. Ingreso de coordenadas de latitud y longitud en la ventana principal del programa.



Figura 24. Resultados del programa, nivel cerámico y densidad de rayos a tierra, con sus respectivas unidades.



Figura 25. Ventana que se despliega al presionar “Coordenadas UTM”.



Figura 26. Resultados desplegados al ingresar por teclado las coordenadas UTM se obtiene la latitud y longitud decimal.

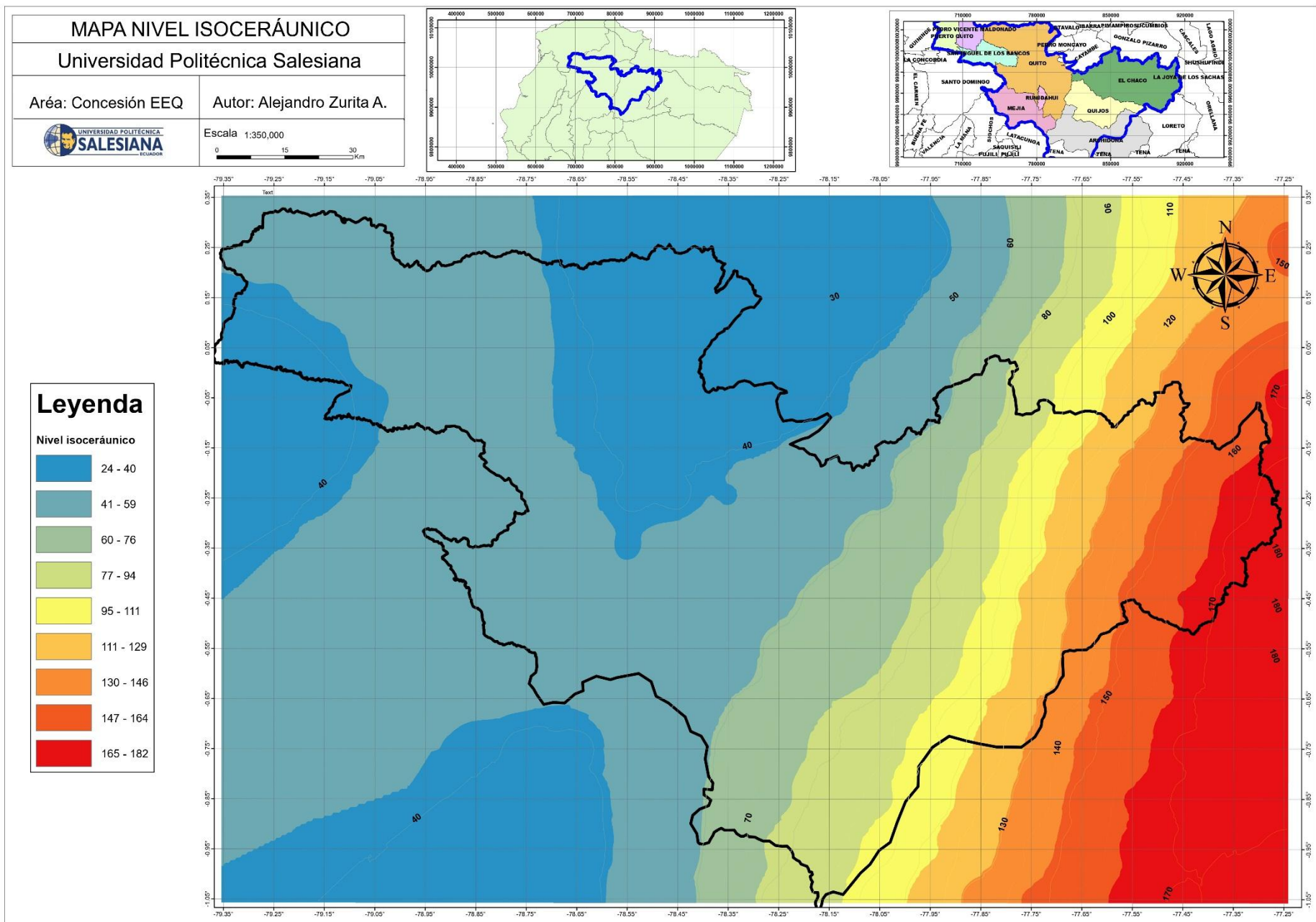


Figura 27. Mapa Isoceráunico del área de concesión de la EEQ.

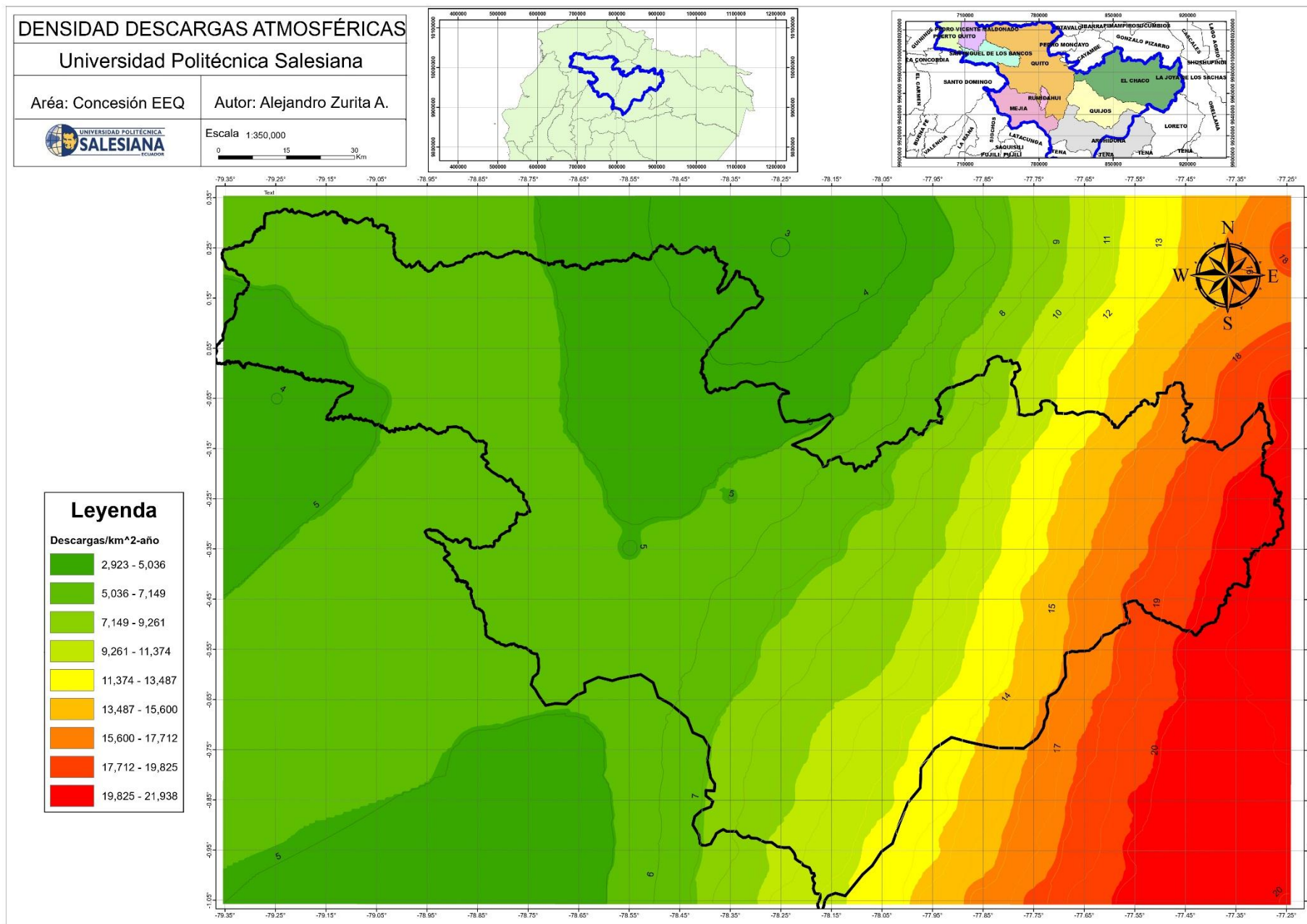


Figura 28. Mapa de densidad de descargas atmosféricas, del área de concesión de la EEQ.

CONCLUSIONES

En el área urbana de Quito el promedio de nivel ceráunico es de 40 días con tormenta eléctrica al año, siendo esto una aproximación porque la relación de densidad de descargas atmosféricas con el nivel ceráunico no es 100% lineal.

En el área urbana de Quito el promedio de densidad de descargas atmosféricas es de 4,85 (descargas/ km^2 -año), en donde se observa que al sur de Quito hay una mayor cantidad de tormentas eléctricas que en el norte.

En el área de concesión de la EEQ, existe una variación de la densidad de descargas atmosféricas de un mínimo de 2,92301125 a un máximo de 21,9428875 (Descargas/ km^2 - año).

En el área de concesión de la EEQ, existe una variación del nivel ceráunico de un mínimo de 24 a un máximo de 182 (Días con tormenta eléctrica al año).

Se observa un aumento importante en la densidad de descargas atmosféricas y el nivel ceráunico, en sectores que se encuentran más hacia el oriente, aquí se encuentran los valores más altos de ambos índices de esta investigación.

A través de la utilización de mapas actualizados y georreferenciados para proyectos eléctricos de alto y bajo voltaje se puede reducir la probabilidad de falla o accidente, mejorando el diseño de protecciones contra descargas atmosféricas.

En el área de concesión de la EEQ los meses de septiembre, octubre y noviembre son en donde se registran más tormentas eléctricas, sin embargo, el cambio climático hace que esto esté en constante variación.

El INAMHI no tiene registros digitales propios sobre descargas atmosféricas, razón por la cual no se ha podido avanzar en este campo investigativo, se les da prioridad a otros índices como: pluviales, de radiación, de viento.

Se proporciona una herramienta como la aplicación de Matlab en donde se puede observar un valor de nivel ceráunico actualizado, y de la cantidad de rayos por unidad de superficie al año, aproximado al real, con base de datos de misiones satelitales de la NASA recabadas por 16 años para este caso, lo que convierte este programa en una fuente veraz de información.

RECOMENDACIONES

Utilizar la aplicación creada para observar el nivel de densidad de descargas atmosféricas o nivel cerámico, para de acuerdo a esto tomar decisiones respecto a los sistemas de protección contra descargas atmosféricas de un proyecto. Como el reforzamiento, o no, de los sistemas de protecciones como son fusibles, apartarrayos, pararrayos, hilos de guarda, puntas franklin, aislamientos, sistemas de tierra.

Hacer un estudio más detallado en donde intervengan otro tipo de condiciones climáticas como, viento, presión atmosférica, altura, en el área de investigación propuesta, para determinar la razón específica por la que ciertas zonas tienen mayor densidad de descargas atmosféricas y otras que tienen menos.

Realizar una actualización del mapa isocerámico y la creación de un mapa de densidad de descargas atmosféricas de todo el Ecuador, con la misma resolución de 0,1 grados geográficos para una alta precisión.

Crear bases de datos digitales, para el registro de parámetros o índices que muestren el comportamiento de las descargas atmosféricas en las estaciones meteorológicas del INAMHI y Secretaría del Ambiente.

Utilizar la base de datos LIS 0.1 Degree Very High Resolution Gridded Lightning Full Climatology (VHRFC) de Global Hydrology Resource Center de la NASA, para comparar los resultados con esta base de datos utilizada que fue la Seasonal Climatology (VHRSC).

Realizar un informe oficial por parte del INAMHI hacia las autoridades del Estado, en donde se solicite la compra de sensores de descargas atmosféricas para el Ecuador, exponiendo la importancia y necesidad prioritaria de esto. Ya que internamente, se conoce el problema que genera el no tener este tipo de sensores, pero es importante que la población en general y las autoridades de estado estén al tanto para poder hacer un presupuesto económico y que el proyecto se torne viable.

REFERENCIAS

- [1] J. S. Townsend, *The Theory of Ionization of Gases by Collision*. Constable & Company LTD, 1910.
- [2] K. Verdugo, L. Aires, and H. Merchán, “Contribución para la Implementación de una Red de Detección de Rayos en Ecuador,” *Rev. Politécnica*, vol. 41, no. 1, 2018.
- [3] H. E. Andrango Ríos and D. R. Parra Parra, “Estudio del sistema de apantallamiento para descargas atmosféricas de la línea trifásica de interconexión entre la subestación San Rafael y la central de generación el estado perteneciente a la empresa eléctrica provincial Cotopaxi,” Universidad Técnica de Cotopaxi, 2012.
- [4] Empresa Eléctrica Quito, “EEQ en cifras,” 2017. [Online]. Available: <https://www.eeq.com.ec:8443/nosotros/eeq-en-cifras;jsessionid=EC352BAAE4EC262AECFCCFEFA561356A>. . [Accessed: 15-May-2019].
- [5] J. Diebel, J. Norda, and O. Kretchmer, “El clima promedio en Quito,” 2019. [Online]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/20030/Clima-promedio-en-Quito-Ecuador-durante-todo-el-año#Sections-Sources>. . [Accessed: 15-Nov-2019].
- [6] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, “Red de Estaciones Automáticas | INAMHI,” 2019. [Online]. Available: <http://186.42.174.236/InamhiEmas/>. [Accessed: 15-May-2019].
- [7] G. Enríquez Harper, *Estudio de Sobretensiones Transitorias en Sistemas Eléctricos y Coordinación de Aislamiento*, 2nd ed. Mexico: Editorial Limusa, 1978.
- [8] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, and H. J. Christian, “Where are the lightning hotspots on earth?,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 97, no. 11, pp. 2051–2068, 2016.
- [9] G. R. Tomas Laroj, “Actualización del mapa isoceráunico de Guatemala y su influencia en el diseño de líneas de transmisión,” Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004.
- [10] Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC), *Norma UNE-EN 62305-1, Protección contra el rayo*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2007.
- [11] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), “Sendai framework, for disaster risk reduction,” 2019. [Online]. Available: <https://www.desinventar.net/DesInventar/profiletab.jsp>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [12] K. Saha *et al.*, “Satellite-based observation of lightning climatology over Nepal,” *J. Earth Syst. Sci.*, vol. 128, no. 8, p. 221, Dec. 2019.
- [13] R. J. Blakeslee, “NRT Lightning Imaging Sensor (LIS) on International Space Station (ISS) Science Data,” 2019. [Online]. Available: https://ghrc.nsstc.nasa.gov/hydro/details/isslis_v1_nrt.
- [14] G. Enríquez Harper, *Técnica de las Altas Tensiones*, 2nd ed. Mexico: Editorial Limusa, 1978.
- [15] G. Enríquez Harper, *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*, 1st ed. Mexico: Editorial Limusa, 1975.
- [16] M. Abdel-Salam and U. S. Al-Abdul-Latif, “Simulation of Energized Franklin Rods for Lightning

- Protection,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 3, pp. 651–659, 1997.
- [17] D. Committee, *IEEE guide for Improving the lightning performance of Transmission Lines*. 1997.
- [18] International Electrotechnical Commission - IEC-, “IEC 60071-1,” p. 21, 2011.
- [19] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, no. February. 2013.
- [20] Cirprotec, “Protección contra el rayo y las sobretensiones.” [Online]. Available: <http://www.cirprotec.com/es/Soporte/Area-de-conocimiento/Proteccion-contrasobretensiones/DPS/Sobretensiones-Transitorias-DPS>. [Accessed: 03-Dec-2019].
- [21] Satishielding, “Productos para el apantallamiento electromagnético,” 2017. [Online]. Available: http://www.satishielding.com/wp-content/uploads/2017/05/catalogo_satishielding_es_2017-1.pdf. [Accessed: 10-Dec-2019].
- [22] IEEE, *IEEE Std 998™-2012 Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations*, no. April. 2012.
- [23] M. R. B. Tavakoli and B. Vahidi, “Transmission-lines shielding failure-rate calculation by means of 3-D leader progression models,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 2, pp. 507–516, 2011.
- [24] X.-Z. Liang *et al.*, “Regional Climate–Weather Research and Forecasting Model,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 93, no. 9, pp. 1363–1387, Sep. 2012.
- [25] D. J. Cecil, D. E. Buechler, and R. J. Blakeslee, “Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description,” *Atmos. Res.*, vol. 135–136, pp. 404–414, 2014.
- [26] C. Albrecht; Rachel, I; Steve, Goodman; Dennis, Buechler; Richard J, Blakeslee; Hugh, “LIS 0.1 Degree Very High Resolution Gridded Lightning Seasonal Climatology (VHRSC).” NASA Global Hidrology Resource Center, Alabama, 2016.
- [27] W. H. Hayt and J. A. Buck, *Teoría Electromagnética*, 7ma ed. McGraw-Hill, 2006.
- [28] A. Coticchia and L. Surace, *Risoluzione di problemi geodetici con le minicalcolatrici elettroniche programmabili*, vol. 37. Firenze Italia: Istituto geografico militare, 1978.
- [29] A. D. Dávila Lamas, “Sistema móvil de realidad aumentada para el procesamiento de información semántica de inmuebles,” Instituto Politécnico Nacional, 2017.
- [30] B. Scully, “The Evolution of Maxwell ’ s Equations Through a Brief Critical Examination of the History and Background of the Man and His Times,” *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 3, pp. 94–98, 2014.
- [31] Oficina Internacional de Pesas y Medidas and Organización Intergubernamental de la Convención del Metro, *El Sistema Internacional de Unidades (SI)*, 8th ed. Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), 2006.
- [32] International Union of Pure and Applied Chemistry, *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1997.

ANEXOS

ANEXO 1

Código Matlab de la ventana principal del programa. (Datos ceráunicos)

```
function varargout = Repaso_tesis(varargin)
% REPASO_TESIS MATLAB code for Repaso_tesis.fig
%   REPASO_TESIS, by itself, creates a new REPASO_TESIS or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = REPASO_TESIS returns the handle to a new REPASO_TESIS or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   REPASO_TESIS('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in REPASO_TESIS.M with the given input arguments.
%
%   REPASO_TESIS('Property','Value',...) creates a new REPASO_TESIS or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Repaso_tesis_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Repaso_tesis_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Repaso_tesis

% Last Modified by GUIDE v2.5 20-Jan-2020 13:40:22

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Repaso_tesis_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Repaso_tesis_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Repaso_tesis is made visible.
function Repaso_tesis_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Repaso_tesis (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Repaso_tesis
```

```

%%Esta función se ejecuta inmediatamente el programa se abre, sirve para la
%%presentación de la pantalla, importe de imágenes.

handles.output = hObject;

axes(handles.axes1)
a=imread('UPS2.jpg');
image(a);
axis off;

axes(handles.axes2)
b=imread('EEQ3.jpg');
image(b);
axis off;

axes(handles.axes3)
c=imread('RAYOS.jpg');
image(c);
axis off;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Repaso_tesis wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Repaso_tesis_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
set(handles.figure1,'Name','Programa de Consulta de Descargas Atmosféricas');
varargout{1} = handles.output;

function lati_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to lati (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of lati as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of lati as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function lati_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to lati (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');

```

```
end
```

```
function longi_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to longi (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of longi as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of longi as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function longi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to longi (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
%%BOTÓN ACEPTAR, aquí se encuentra toda la programación principal.
```

```
%Borra los datos en el Command Window.
```

```
clc;
```

```
%Guarda el dato de latitud y longitud ingresadas por teclado, en variables.
```

```
A=str2double(get(handles.lati,'String'))
B=str2double(get(handles.longi,'String'))
```

```
%Control de errores, para puntos fuera del área de concesión.
```

```
if (A >= -1.05 && A <= 0.35)
    v='dentro'
else
    v='fuera'
    errordlg('El valor de latitud debe estar dentro de los rangos de la EEQ, -
1.05<=LAT<=0.35','ERROR')
end
```

```
end
```

```
if (B >= -79.35 && B <= -77.25)
    m='dentro'
```

```
else
    m='fuera'
```

```

        errordlg('El valor de longitud debe estar dentro de los rangos de la EEQ, -
79.35=<LONG<=-77.25', 'ERROR')
end

if(A >= 0.25 && A <= 0.35 && B >= -78.95)

    m='fuera'
    errordlg('El valor de longitud debe estar dentro de los rangos de la EEQ, entre los
valores de latitud LAT >= 0.25 && LAT <= 0.35; la longitud no puede ser más de -
78.95', 'ERROR')
end
%

if(A >= -0.05 && B >= -78.25)

    m='fuera'
    errordlg('Valores de longitud y/o latitud ingresados no corresponden al area de la
EEQ, revise su coordenada', 'ERROR')
end

if(A >= -0.25 && A <= -0.05 && B <= -79.15)

    m='fuera'
    errordlg('El valor de longitud debe estar dentro de los rangos de la EEQ, entre los
valores de latitud LAT >= -0.25 && LAT <= -0.05; la longitud no puede ser menos de -
79.15', 'ERROR')
end

if(A >= -0.35 && A <= -0.25 && B <= -78.95)

    m='fuera'
    errordlg('El valor de longitud debe estar dentro de los rangos de la EEQ, entre los
valores de latitud LAT >= -0.35 && LAT <= -0.25; la longitud no puede ser menos de -
78.95', 'ERROR')
end

    if(A >= -0.45 && A <= -0.35 && B <= -78.95)

        m='fuera'
        errordlg('El valor de longitud debe estar dentro de los rangos de la EEQ, entre los
valores de latitud LAT >= -0.45 && LAT <= -0.35; la longitud no puede ser menos de -
78.95', 'ERROR')
        end

        if(A >= -0.55 && A <= -0.45 && B <= -79.05)

            m='fuera'
            errordlg('El valor de longitud debe estar dentro de los rangos de la EEQ, entre los
valores de latitud LAT >= -0.55 && LAT <= -0.45; la longitud no puede ser menos de -
79.05', 'ERROR')
            end

            if(A >= -0.75 && A <= -0.55 && B <= -78.85)

                m='fuera'
                errordlg('El valor de longitud debe estar dentro de los rangos de la EEQ, entre los
valores de latitud LAT >= -0.75 && LAT <= -0.55; la longitud no puede ser menos de -
78.85', 'ERROR')
                end

                if(A >= -1.05 && A <= -0.75 && B <= -78.65)

```

```

m='fuera'
    errordlg('El valor de longitud debe estar dentro de los rangos de la EEQ, entre los
valores de latitud LAT >= -1.05 && LAT <= -0.75; la longitud no puede ser menos de -
78.65','ERROR')
end

%Control de errores, si se ingresa por teclado valores que no sean numéricos.

if isnan(A)
    errordlg('El valor de latitud debe ser numérico','ERROR')
    set(handles.lati,'String',0);
    A=0;
end

if isnan(B)
    errordlg('El valor de longitud debe ser numérico','ERROR')
    set(handles.longi,'String',0);
    B=0;
end

%Base de datos, pasada directamente en el programa ya que antes se
%encontraban en un archivo del excel pero generaba problemas porque se
%tenía que cambiar el path, por lo que se importaron directamente en estas
%líneas los datos necesarios para el programa.

lat=[-0.45; -0.55; -0.35; -0.25; -0.55; -0.75; -0.45; -0.75; -0.85; -0.05; -0.35; -
0.85; -0.85; -1.05; -0.95; -0.75; -0.95; -1.05; -0.95; -1.05; -0.55; -0.25; -0.95; -
0.85; -1.05; -0.45; -0.75; -1.05; -0.35; -0.95; 0.25; -0.55; -0.05; -0.85; -0.25; -
0.45; -1.05; -0.75; -0.35; -0.95; -0.55; -0.25; -0.85; -0.45; -1.05; -0.05; 0.25; -
0.75; -0.35; -0.95; -0.25; -0.05; -0.85; -0.55; -1.05; -0.45; -0.75; 0.25; -0.95; -
0.35; -0.85; -1.05; -0.05; -0.25; -0.75; -0.55; -0.95; 0.25; -0.45; -1.05; -0.85; -
0.35; -0.75; -0.95; -0.05; -1.05; -0.55; -0.85; -0.25; 0.25; -0.45; -0.95; -0.75; -
0.85; -0.55; -0.35; -0.75; -1.05; -0.45; -0.55; -0.25; -0.05; -0.95; -0.35; -0.85;
0.25; -0.45; -0.55; -0.75; -0.45; -0.35; -1.05; -0.25; -0.55; -0.95; -0.85; -0.35; -
0.05; -0.25; -0.75; -0.45; -0.55; 0.25; -0.45; -0.55; 0.35; 0.35; -0.55; -0.35;
0.25; 0.15; -0.35; -0.35; -0.45; -0.25; 0.05; -0.45; 0.15; -0.55; 0.25; 0.05; 0.25;
0.15; 0.35; 0.35; -0.35; -0.25; -0.25; -1.05; -0.05; 0.25; -0.45; -0.05; -0.05; 0.05;
0.25; 0.05; -0.25; -0.35; -0.55; -0.55; -0.45; 0.15; 0.15; 0.35; -0.35; -0.75; 0.25; -
0.45; -0.85; -0.05; -0.25; -0.95; -0.55; 0.25; -0.25; 0.05; -0.05; -0.35; 0.15; -0.05;
0.15; -0.75; 0.15; 0.05; -0.25; -0.05; -0.25; -0.75; -0.25; -0.75; 0.25; 0.05; 0.05; -
0.05; -0.05; 0.05; 0.25; -0.85; -0.05; -0.25; -0.05; 0.15; -0.05; -0.05; 0.05; 0.25; -
1.05; -0.95; 0.15; -0.05; 0.05; 0.05; 0.25; 0.25; 0.15; 0.15; 0.25; 0.25; 0.25];
lng=[-77.2500000000001;-77.2500000000001;-77.2500000000001;-77.2500000000001;-
77.3500000000001;-77.2500000000001;-77.3500000000001;-77.3500000000001;-
77.4500000000001;-77.2500000000001;-77.3500000000001;-77.3500000000001;-
77.2500000000001;-77.4500000000001;-77.4500000000001;-77.4500000000001;-
77.3500000000001;-77.5500000000001;-77.2500000000001;-77.3500000000001;-
77.4500000000001;-77.3500000000001;-77.5500000000001;-77.5500000000001;-
77.2500000000001;-77.4500000000001;-77.5500000000001;-77.6500000000001;-
77.4500000000001;-77.6500000000001;-77.2500000000001;-77.5500000000001;-
77.3500000000001;-77.6500000000001;-77.4500000000001;-77.5500000000001;-
77.7500000000001;-77.6500000000001;-77.5500000000001;-77.7500000000001;-
77.6500000000001;-77.5500000000001;-77.7500000000001;-77.6500000000001;-
77.8500000000001;-77.4500000000001;-77.3500000000001;-77.7500000000001;-
77.6500000000001;-77.8500000000001;-77.6500000000001;-77.5500000000001;-
77.8500000000001;-77.7500000000001;-77.9500000000001;-77.7500000000001;-
77.8500000000001;-77.4500000000001;-77.9500000000001;-77.7500000000001;-
77.9500000000001;-78.0500000000001;-77.6500000000001;-77.7500000000001;-
77.9500000000001;-77.8500000000001;-78.0500000000001;-77.5500000000001;-
77.8500000000001;-78.1500000000001;-78.0500000000001;-77.8500000000001;-
78.0500000000001;-78.1500000000001;-77.7500000000001;-78.2500000000001;-
77.9500000000001;-78.1500000000001;-77.8500000000001;-77.6500000000001;-

```

77.95000000000001;-78.25000000000001;-78.15000000000001;-78.25000000000001;-
78.05000000000001;-77.95000000000001;-78.25000000000001;-78.35000000000001;-
78.05000000000001;-78.15000000000001;-77.95000000000001;-77.85000000000001;-
78.35000000000001;-78.05000000000001;-78.35000000000001;-77.75000000000001;-
78.15000000000001;-78.25000000000001;-78.35000000000001;-78.25000000000001;-
78.15000000000001;-78.45000000000000;-78.05000000000001;-78.35000000000001;-
78.45000000000000;-78.45000000000000;-78.25000000000001;-77.95000000000001;-
78.15000000000001;-78.45000000000000;-78.35000000000001;-78.45000000000000;-
77.85000000000001;-78.95000000000000;-78.85000000000000;-78.85000000000000;-
79.05000000000000;-79.15000000000000;-78.95000000000000;-78.35000000000001;-
79.05000000000000;-78.95000000000000;-78.85000000000000;-78.95000000000000;-
78.45000000000000;-78.25000000000001;-78.95000000000000;-78.75000000000000;-
79.05000000000000;-78.75000000000000;-79.15000000000000;-78.85000000000000;-
78.95000000000000;-78.85000000000000;-78.95000000000000;-79.25000000000000;-
78.75000000000000;-78.95;-78.85000000000000;-78.55000000000000;-78.95000000000000;-
79.25000000000000;-78.65000000000000;-78.05000000000001;-78.85000000000000;-
79.05000000000000;-78.85000000000000;-78.75000000000000;-78.75000000000000;-
78.65000000000000;-78.55000000000000;-78.65000000000000;-79.05000000000000;-
78.75000000000000;-79.15000000000000;-79.35000000000000;-78.45000000000000;-
78.55000000000000;-79.35000000000000;-78.55000000000000;-78.55000000000000;-
78.75000000000000;-78.65000000000000;-78.55000000000000;-79.05000000000000;-
78.75000000000000;-78.35000000000001;-78.65000000000000;-78.65000000000000;-
78.55000000000000;-79.25000000000000;-79.05000000000000;-78.65000000000000;-
78.85000000000000;-79.35000000000000;-79.15000000000000;-79.05;-78.15000000000001;-
78.55000000000000;-78.75000000000000;-78.45000000000000;-78.65000000000000;-
78.65000000000000;-79.25000000000000;-79.35000000000000;-78.55000000000000;-
79.15000000000000;-78.55000000000000;-77.95000000000001;-78.65000000000000;-
78.45000000000000;-79.15;-78.25000000000001;-78.55000000000000;-78.35000000000001;-
79.35000000000000;-78.45000000000000;-78.55000000000000;-78.65000000000000;-
78.65000000000000;-78.45000000000000;-79.25000000000000;-78.25000000000001;-
78.35000000000001;-78.45000000000000;-78.05000000000001;-78.35000000000001;-
78.25000000000001;-78.15000000000001;-78.35000000000001;-78.25000000000001];
cerau=[21.942887500000;21.914143750000;21.879195000000;21.696238750000;21.196918750
000;21.104391250000;20.997263750000;20.870882500000;20.737475000000;20.7290800000
00;20.724243750000;20.723878750000;20.719772500000;20.613922500000;20.610363750000
;20.579521250000;20.452227500000;20.411803750000;20.334697500000;20.229486250000;2
0.214612500000;20.170447500000;20.114146250000;19.976358750000;19.946702500000;19.
804170000000;19.583983750000;19.545750000000;19.140600000000;18.876522500000;18.71
8021250000;18.669202500000;18.546197500000;18.417991250000;18.231567500000;18.2235
37500000;17.984188750000;17.835907500000;17.543451250000;16.992483750000;16.748298
750000;16.596093750000;16.352912500000;16.293873750000;16.270696250000;16.24012750
0000;15.995577500000;15.631581250000;15.583036250000;15.213200000000;14.8003850000
00;14.545158750000;14.444601250000;14.348423750000;14.305718750000;13.899108750000
0;13.532192500000;13.511296250000;13.413385000000;13.156060000000;12.751822500000;
12.634110000000;12.584743750000;12.387735000000;11.921903750000;11.875183750000;11
.749806250000;11.643682500000;11.383985000000;11.318467500000;11.155403750000;10.6
48327500000;10.575418750000;10.469112500000;10.336800000000;10.297106250000;10.229
49000000;10.003281250000;9.857463750000;9.629612500000;9.598952500000;9.558802
500000;9.521298750000;9.159492500000;9.146170000000;8.939123750000;8.73682250
0000;8.489352500000;8.471102500000;8.230111250000;8.140138750000;7.9382937500
00;7.934735000000;7.807350000000;7.735171250000;7.724860000000;7.668467500000
00;7.541995000000;7.432495000000;7.059282500000;6.960458750000;6.95297625000000
;6.932992500000;6.553027500000;6.495083750000;6.446173750000;6.417521250000;6
.388960000000;6.266411250000;6.262122500000;6.176347500000;5.843467500000;5.7
789537500000;5.765266250000;5.743822500000;5.660420000000;5.636421250000;5.625
1975000000;5.625197500000;5.625106250000;5.611875000000;5.603936250000;5.60311
50000000;5.593990000000;5.590431250000;5.584773750000;5.574371250000;5.5589500
00000;5.505477500000;5.505386250000;5.504656250000;5.498542500000;5.498177500
0000;5.458301250000;5.454651250000;5.445617500000;5.424173750000;5.412403;5.39
07762500000;5.340771250000;5.337760000000;5.333836250000;5.331920000000;5.3306
425000000;5.299982500000;5.295602500000;5.266676250000;5.262661250000;5.244685
0000000;5.240670000000;5.236563750000;5.226161250000;5.224518750000;5.21767500
00000;5.216671250000;5.214207500000;5.199972500000;5.190665000000;5.1726887500
0000;5.166392500000;5.161282500000;5.135185000000;5.112463750000;5.065652500000
00;5.062732500000;5.041836250000;4.990371250000;4.985626250000;4.9856262500000

```
;4.97476750000000;4.96536875000000;4.94346875000000;4.91892250000000;4.91171375000000;4
.90897625000000;4.90888500000000;4.897935;4.84729125000000;4.79080750000000;4.784693750
00000;4.77912750000000;4.72866625000000;4.68395375000000;4.65493625000000;4.65466250000
000;4.56104000000000;4.48703625000000;4.48521125000000;4.44734250000000;4.42115375000000
0;4.39606000000000;4.371058;4.36010750000000;4.33848125000000;4.28865875000000;4.144940
00000000;4.14019500000000;4.08873000000000;4.06016875000000;4.05679250000000;3.97156500
000000;3.95769500000000;3.90942375000000;3.86087875000000;3.62992500000000;3.5509025000
0000;3.54506250000000;3.43173000000000;3.16272500000000;3.08415875000000;2.923011250000
00];
rayos=[182.857395833333;182.617864583333;182.326625000000;180.801989583333;176.64098958
3333;175.869927083333;174.977197916667;173.924020833333;172.812291666667;172.7423333333
33;172.702031250000;172.698989583333;172.664770833333;171.782687500000;171.753031250000
;171.496010416667;170.435229166667;170.098364583333;169.455812500000;168.579052083333;1
68.455104166667;168.087062500000;167.617885416667;166.469656250000;166.222520833333;165
.034750000000;163.199864583333;162.881250000000;159.505000000000;157.304354166667;155.9
83510416667;155.576687500000;154.551645833333;153.483260416667;151.929729166667;151.862
812500000;149.868239583333;148.632562500000;146.195427083333;141.604031250000;139.56915
6250000;138.300781250000;136.274270833333;135.782281250000;135.589135416667;135.3343958
33333;133.296479166667;130.263177083333;129.858635416667;126.776666666667;123.336541666
667;121.209656250000;120.371677083333;119.570197916667;119.214322916667;115.82590625000
0;112.768270833333;112.594135416667;111.778208333333;109.633833333333;106.265187500000;
105.284250000000;104.872864583333;103.231125000000;99.3491979166667;98.95986458333333;97
.91505208333333;97.0306875000000;94.8665416666667;94.32056250000000;92.9616979166667;88.7
360625000000;88.12848958333333;87.2426041666667;86.14000000000000;85.80921875000000;85.245
7500000000;83.36067708333333;82.1455312500000;80.24677083333333;79.99127083333333;79.65668
75000000;79.3441562500000;76.3291041666667;76.21808333333333;74.4926979166667;72.8068541
666667;70.7446041666667;70.59252083333333;68.5842604166667;67.83448958333333;66.152447916
6667;66.1227916666667;65.0612500000000;64.4597604166667;64.37383333333333;63.90389583333
33;62.84995833333333;61.93745833333333;58.8273541666667;58.0038229166667;57.9414687500000
;57.7749375000000;54.6085625000000;54.1256979166667;53.71811458333333;53.4793437500000;5
3.24133333333333;52.2200937500000;52.1843541666667;51.46956250000000;48.69556250000000;48.
1579479166667;48.0438854166667;47.8651875000000;47.1701666666667;46.97017708333333;46.87
664583333333;46.87664583333333;46.8758854166667;46.76562500000000;46.69946875000000;46.6926
2500000000;46.61658333333333;46.58692708333333;46.5397812500000;46.45309375000000;46.324583
33333333;45.8789791666667;45.8782187500000;45.8721354166667;45.82118750000000;45.81814583
333333;45.4858437500000;45.45542708333333;45.38014583333333;45.2014479166667;45.10335;44.9
231354166667;44.50642708333333;44.48133333333333;44.4486354166667;44.4326666666667;44.422
020833333333;44.16652083333333;44.13002083333333;43.8889687500000;43.8555104166667;43.70570
833333333;43.6722500000000;43.6380312500000;43.5513437500000;43.53765625000000;43.4806250
000000;43.4722604166667;43.4517291666667;43.3331041666667;43.2555416666667;43.105739583
33333;43.05327083333333;43.0106875000000;42.79320833333333;42.60386458333333;42.21377083333
33;42.1894375000000;42.01530208333333;41.58642708333333;41.5468854166667;41.5468854166667
;41.45639583333333;41.3780729166667;41.1955729166667;40.99102083333333;40.9309479166667;4
0.9081354166667;40.9073750000000;40.81613;40.3940937500000;39.92339583333333;39.87244791
66667;39.8260625000000;39.40555208333333;39.0329479166667;38.7911354166667;38.7888541666
667;38.0086666666667;37.3919687500000;37.3767604166667;37.06118750000000;36.842947916666
7;36.63383333333333;36.42548;36.3342291666667;36.1540104166667;35.7388229166667;34.54116
6666667;34.5016250000000;34.0727500000000;33.83473958333333;33.8066041666667;33.0963750
000000;32.9807916666667;32.5785312500000;32.17398958333333;30.24937500000000;29.590854166
6667;29.5421875000000;28.5977500000000;26.3560416666667;25.7013229166667;24.35842708333
33];
```

```
%Declaración de variables.
```

```
s = 208;
val_lat=B;
val_lng=A;
```

```
%Zona 1
```

```
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -79.35 && B < -79.25)
```

```
promecera= 36.27548698;
promerayos= 4.353058438;
promeceraf=fix(promecera);
a=num2str(promeceraf);
b=num2str(promerayos);
```



```

        set(handles.text1,'string',a);
        set(handles.text0,'string',b);

end
%Zona 2
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -79.25 && B < -79.15)

    promecera= 38.96983333;
    promerayos= 4.67638;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end
%Zona 3
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -79.15 && B < -79.05)

    promecera= 40.90623438;
    promerayos= 4.908748125;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end
%Zona 4
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -79.05 && B < -78.95)

    promecera= 44.06500521;
    promerayos= 5.287800625;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end
%Zona 5
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -78.95 && B < -78.85)

    promecera= 45.23053385;
    promerayos= 5.427664063;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end
%Zona 6
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -78.85 && B < -78.75)

    promecera= 44.15910677;
    promerayos= 5.299092813;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

```

```

end
%Zona 7
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -78.75 && B < -78.65)

    promecera= 42.4356224;
    promerayos= 5.092274688;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end
%Zona 8
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -78.65 && B < -78.55)

    promecera= 39.61979948;
    promerayos= 4.754375938;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end
%Zona 9
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -78.55 && B < -78.45)

    promecera= 36.63022135;
    promerayos= 4.395626563;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end
%Zona 10
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -78.45 && B < -78.35)

    promecera= 34.76206771;
    promerayos= 4.171448125;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end
%Zona 11
if(A >= -0.05 && A <= 0.05 && B >= -78.35 && B < -78.25)

    promecera= 34.20639323;
    promerayos= 4.104767188;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);

```

```

        set(handles.text0,'string',b);

end

%%Zona 12

if(A > 0.15 && A <= 0.25 && B > -78.45 && B < -78.35)

    promecera= 29.6473151;
    promerayos= 3.557677813;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end

%Zona 13

if(A >= 0.15 && A <= 0.25 && B >= -78.35 && B <= -78.25)

    promecera= 27.04992188;
    promerayos= 3.245990625;
    promeceraf=fix(promecera);
    a=num2str(promeceraf);
    b=num2str(promerayos);
    set(handles.text1,'string',a);
    set(handles.text0,'string',b);

end


%Encuentra puntos proximos en longitud
for c = 1:s
    if val_lat>lng(c)
        veclngmay(c)=lng(c);
        veclngmay(veclngmay>val_lat)=-100000;
        mayorlng=max(veclngmay);
        p1=c;
    end
    if val_lat<lng(c)
        veclngmen(c)=lng(c);
        veclngmen(veclngmen<val_lat)=100000;
        menorlng=min(veclngmen);
        p2=c;
    end
end

%Encuentra puntos proximos en latitud
for d = 1:s
    if val_lng>lat(d)
        veclatmay(d)=lat(d);
        veclatmay(veclatmay>val_lng)=-100000;
        mayorlat=max(veclatmay);
        p3=d;
    end
    if val_lng<lat(d)
        veclatmen(d)=lat(d);

```

```

        veclatmen(veclatmen<val_lng)=100000;
        menorlat=min(veclatmen);
        p4=d;
        end
end

```

%Hace las comparaciones necesarias para obtener las posiciones de los 4
%puntos más próximos al valor de longitud y latitud ingresado por teclado.

```

for x=1:s
    if menorlat==lat(x) & menorlng==lng(x)
        posi=x
    end
    if menorlat==lat(x) & mayorlng==lng(x)
        posi1=x;
    end
    if mayorlat==lat(x) & menorlng==lng(x)
        posi2=x;
    end
    if mayorlat==lat(x) & mayorlng==lng(x)
        posi3=x;
    end
end
end

```

%Se toma el valor ceráunico de las posiciones de los puntos más cercanos al
%deseado y se hace un promedio.

```

promecera=(cerau(posi)+cerau(posi1)+cerau(posi2)+cerau(posi3))/4
cerau(posi)
cerau(posi1)
cerau(posi2)
cerau(posi3)

```

%Se toma el valor de densidad de rayos a tierra de las posiciones de los puntos más
cercanos al
%deseado y se hace un promedio.

```

promerayos=(rayos(posi)+rayos(posi1)+rayos(posi2)+rayos(posi3))/4
rayos(posi)
rayos(posi1)
rayos(posi2)
rayos(posi3)

```

```

promerayosf=fix(promerayos);

```

%Se imprime al Command Window los valores de los puntos más cercanos al
%deseado para corroborar.

```

mayorlng
menorlng
mayorlat
menorlat

```

%Se prepara los valores para imprimir, cambiando el formato de número a
%string.

```

a=num2str(promerayosf);
b=num2str(promecera);

```

%Se coloca los valores en los espacios correspondientes para que el usuario
%los observe directamente.

```

set(handles.text1,'string',a);
set(handles.text0,'string',b);

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

%%BOTÓN COORDENADAS UTM, abre el otro GUI correspondiente al código que
%%convierte las coordenadas UTM a coordenadas geográficas decimales. Y
%%cierra el otro GUI.

```

```
close(Repaso_tesis);
RepasoUTM
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
%%BOTÓN LIMPIAR, setea todas las casillas con un espacio en blanco
borra=char(' ');
set(handles.longi,'string',borra);
set(handles.lati,'string',borra);
set(handles.text1,'string',borra);
set(handles.text0,'string',borra);
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
%%BOTÓN ?INFO, despliega un cuadro de texto con la información necesaria
%%para ejecutar el programa y abre un archivo PDF con el manual de usuario.
helpdlg('Este programa está basado en la información obtenida durante 16 años, desde el año de 1998 hasta el año 2013, del satélite (LIS), The Lightning Imaging Sensor, que se encuentra a bordo de la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) de la NASA. Para usar el programa, ingrese la coordenada de longitud y de latitud dentro del área de concesión de la EEQ, para que este responda con los datos de la: Densidad de Descargas Atmosféricas o Flash Rate Density (FRD) y el nivel ceráunico en el punto específico. Si usted tiene coordenadas en Metros es decir (UTM) por favor dirigirse a la pestaña "Coordenadas UTM" y hacer la conversión. Hecho por: Alejandro Zurita A., Universidad Politécnica Salesiana','Información');
winopen('Manual.pdf')
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
%%BOTÓN MAPAS, abre un archivo en formato PDF, que contiene los mapas de
%%nivel isoceráunico y de densidad de rayos a tierra.
```

```
winopen('Mapas.pdf')
```

ANEXO 2

Código Matlab de la ventana secundaria del programa. (Coordenadas UTM a Geográficas).

```
function varargout = RepasoUTM(varargin)
% REPASOUTM MATLAB code for RepasoUTM.fig
%   REPASOUTM, by itself, creates a new REPASOUTM or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = REPASOUTM returns the handle to a new REPASOUTM or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   REPASOUTM('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in REPASOUTM.M with the given input arguments.
%
%   REPASOUTM('Property','Value',...) creates a new REPASOUTM or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before RepasoUTM_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to RepasoUTM_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help RepasoUTM

% Last Modified by GUIDE v2.5 12-Jan-2020 21:09:08

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @RepasoUTM_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @RepasoUTM_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
```

```

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before RepasoUTM is made visible.
function RepasoUTM_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to RepasoUTM (see VARARGIN)

% Choose default command line output for RepasoUTM
handles.output = hObject;

axes(handles.axes1)
a=imread('UPS2.jpg');
image(a);
axis off;

axes(handles.axes2)
b=imread('EEQ3.jpg');
image(b);
axis off;

axes(handles.axes3)
c=imread('coord.jpg');
image(c);
axis off;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes RepasoUTM wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

```



```

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = RepasoUTM_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%%BOTÓN CALCULAR, aquí se encuentra toda la programación referida a las
%%ecuaciones Cottichia - Surace, las cuales convierten un dato en
%%coordenadas UTM a coordenadas geográficas y viceversa.

%Borra los datos en el Command Window.
clc;

%Guarda el dato de UTMX y UTMY ingresadas por teclado, en variables.
X=str2double(get(handles.edit1,'String'))
Y=str2double(get(handles.edit2,'String'))

%WS1984 UTM A GEOGRÁFICAS

```

UTMX=X;

UTMY=Y;

%El Ecuador se encuentra en la zona 17, hemisferio sur de las coordenadas
%UTM.

Huso=17;

%Condiciones previas de la proyección WS 1984 (Datos)

sur=UTMY-10000000; %Corrección falso norte.

semiejemayor=6378137;

semiejemenor=6356752.314245;

excentricidad=sqrt(semiejemayor^2-semiejemenor^2)/semiejemayor;

excentricidad2=sqrt(semiejemayor^2-semiejemenor^2)/semiejemenor;

excent2cuad=(excentricidad2)^2;

radiopolarcurv=(semiejemayor^2)/semiejemenor;

%Ecuaciones Coticchia-Surace que intentan mediante operaciones
%trigonómicas y matemáticas desglosar el globo terraqueo para que se
%convierta a longitud y latitud.

Meridiano=6*Huso-183;

Fi=sur/(6366197.724*0.9996);

Ni=(radiopolarcurv/(1+excent2cuad*(cos(Fi))^2)^(1/2))*0.9996;

a=(UTMX-500000)/Ni;

a1=sin(2*Fi);

a2=a1*(cos(Fi))^2;

j2=Fi+(a1/2);

j4=(3*j2+a2)/4;

j6=(5*j4+a2*(cos(Fi))^2)/3;

Alfa=(3/4)*excent2cuad;

Beta=(5/3)*Alfa^2;

Gamma=(35/27)*Alfa^3;

Bfi=0.9996*radiopolarcurv*(Fi-(Alfa*j2)+(Beta*j4)-(Gamma*j6));

b=(sur-Bfi)/Ni;

Zeta=((excent2cuad*a^2)/2)*(cos(Fi))^2;

Xi=a*(1-(Zeta/3));

Eta=b*(1-Zeta)+Fi;

Senhxi=(exp(Xi)-exp(-Xi))/2;

Deltalambda=atan(Senhxi/cos(Eta));

Tau=atan(cos(Deltalambda)*tan(Eta));

%Fi en radianes

Firad=Fi+(1+excent2cuad*(cos(Fi))^2-(3/2)*excent2cuad*sin(Fi)*cos(Fi)*(Tau-Fi))*(Tau-Fi);

%Obtención final de las coordenadas geográficas en x e y en decimales.

Coordx=(Deltalambda/pi)*180+Meridiano

Coordy=(Firad/pi)*180

%Se prepara los valores para imprimir, cambiando el formato de número a

%string.

a=num2str(Coordx);

b=num2str(Coordy);

%Se coloca los valores en los espacios correspondientes para que el usuario

%los observe directamente.

%Control de errores, para puntos fuera del área de concesión.

if (X >= 682236.585 && X <= 896568.351)

v='dentro'

else

v='fuera'

errorldg('El valor de UTMX debe estar dentro de los rangos de la EEQ, 682236.585=<UTMX<=896568.351','ERROR')

b=0;

a=0;

end

if (Y >= 9896369.684 && Y <= 10037817.851)

v1='dentro'

else

v1='fuera'

errorldg('El valor de UTMX debe estar dentro de los rangos de la EEQ, 9896369.684=<UTMY<=10037817.851','ERROR')

b=0;

a=0;

end

%Control de errores, si se ingresa por teclado valores que no sean numéricos.

if isnan(X)

errorldg('El valor de UTMX debe ser numérico','ERROR')

set(handles.edit1,'String',0);

X=0;

```

b=0;
a=0;
end

```

```

if isnan(Y)
    errordlg('El valor de UTM de debe ser numérico','ERROR')
    set(handles.edit2,'String',0);
    Y=0;
    c=1
    b=0;
    a=0;

end

```

```

set(handles.text2,'string',a);
set(handles.text3,'string',b);

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton2.

```

```

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

%%BOTÓN REGRESAR, vuelve a la pantalla de cálculo de niveles cerámicos y

```

```

%%cierra la actual.

```

```

close(RepasoUTM);

```

```

Repaso_tesis

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton3.

```

```

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to pushbutton3 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

%%BOTÓN ?INFO, despliega un cuadro de texto con la información necesaria

```

```

%%para ejecutar el programa y abre un archivo PDF con el manual de usuario.

```

helpdlg('El sistema de coordenadas geográficas UTM (Universal Transverse Mercator) se utiliza para referenciar cualquier punto de la superficie terrestre, utilizando para ello un tipo particular de proyección cilíndrica para representar la Tierra sobre el plano. Varios sistemas GPS utilizan este tipo de proyección. Ingrese el valor UTMX y UTMY de su GPS (generalmente se encuentra con un valor en Metros) y obtendrá el valor en Coordenadas geográficas para que pueda volver a la anterior pantalla a hacer el cálculo de nivel cerámico','Ayuda');

winopen('Manual.pdf')

```
% --- Executes on button press in pushbutton4.  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)  
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)  
borra=char(' ');  
set(handles.edit1,'string',borra);  
set(handles.edit2,'string',borra);  
set(handles.text2,'string',borra);  
set(handles.text3,'string',borra);
```

ANEXO 3

Manual de usuario de la aplicación.

Paso 1: Al iniciar la aplicación usted se encontrará con una pantalla como esta:



Verifique las unidades de su GPS, sistema ArcGIS o del sitio de donde esté sacando las coordenadas para la geolocalización del punto donde desea realizar la consulta. Si tiene la opción de elegir, elija coordenadas geográficas decimales (No en grados minutos y segundos) e ingréselas directamente.

Si su sistema solo tiene la opción de coordenadas UTM, (coordenadas están en metros), primeramente, diríjase al botón “Coordenadas UTM”. En pasos posteriores se explicará el uso de esta ventana.

Paso 2: Debe ingresar los valores de longitud y latitud en coordenadas geográficas decimales, separando los decimales con un punto (.) y no con coma (,).

Obligatoriamente las coordenadas que ingrese deben estar dentro del área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ S.A), si no le saldrá un cuadro de diálogo que le informe este error.

No puede ingresar valores NO numéricos, si lo hace, también le saldrá un cuadro de diálogo que le informe este error.



Paso 3: Pulse el botón “Aceptar” cuando haya ingresado las coordenadas.



Paso 4: La aplicación calculará el valor de, densidad de rayos a tierra, con unidades: (Descargas/ km^2 -año) y el valor de nivel cerámico, con unidades: (Número de días con tormenta eléctrica en el año).

Repaso_tesis

Nivel Cerámico EEQ

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

Longitud (X)

-78.515

Latitud (Y)

-0.3934

EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.
Siempre junto a ti

Densidad de rayos a tierra (DRT) (GFD)

5.2329

Descargas /km²-año

Nivel cerámico (Td)

43

Días con tormenta en el año

Aceptar

Limpiar

Mapas

Coordenadas UTM

? INFO.

Coordenadas UTM.

Si usted posee coordenadas UTM, haga click en el botón “Coordenadas UTM”

Repaso_tesis

Nivel Cerámico EEQ

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

Longitud (X)

Latitud (Y)

EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.
Siempre junto a ti

Densidad de rayos a tierra (DRT) (GFD)

Descargas /km²-año

Nivel cerámico (Td)

Días con tormenta en el año

Aceptar

Limpiar

Mapas

Coordenadas UTM

? INFO.

Paso 1: Al presionar ese botón, usted se encontrará con una pantalla como esta:



Paso 2: Debe ingresar los valores de UTMX y UTMY, separando los decimales con un punto (.) y no con coma (,).

Obligatoriamente las coordenadas que ingrese deben estar dentro del área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ S.A), si no le saldrá un cuadro de diálogo que le informe este error.

No puede ingresar valores NO numéricos, si lo hace, también le saldrá un cuadro de diálogo que le informe este error.

Paso 3: Pulse el botón “Calcular” cuando haya ingresado las coordenadas.



Paso 4: La aplicación calculará el valor de las coordenadas ingresadas en coordenadas geográficas decimales.

Paso 5: Una vez que usted tenga las coordenadas UTM convertidas a coordenadas geográficas decimales, debe copiar y pegar estos valores en otra hoja o apuntarlos en un papel aparte para que después pueda regresar a la anterior pantalla y colocarlos.

The screenshot shows the 'RepasoUTM' web application interface. At the top, it says 'UTM a Coordenadas Geográficas' and features the logo of 'UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR'. Below the header, there are three input fields: 'UTMX' with the value '780502.7395', a central logo for 'EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.', and 'UTMY' with the value '9981191.58'. Below these fields is a world map with a grid. Two blue circles are drawn on the map, one over South America containing the value '-78.48' and another over Europe containing the value '-0.17'. At the bottom, there are four buttons: '? INFO.', 'Calcular', 'Limpiar', and 'Regresar'. The 'Calcular' button is highlighted with a blue border.

Paso 6: Este paso es opcional, si usted tiene una nueva consulta puede pulsar el botón “Limpiar”.

This screenshot shows the same 'RepasoUTM' web application interface as the previous one, but with the input fields for 'UTMX' and 'UTMY' empty. The world map is also empty. The 'Limpiar' button at the bottom is now highlighted with a red circle, indicating it should be clicked to clear the fields for a new calculation.

Paso 7: Pulse el botón “Regresar” ya con los apuntes de las coordenadas geográficas decimales y regresará a la pantalla de inicio.

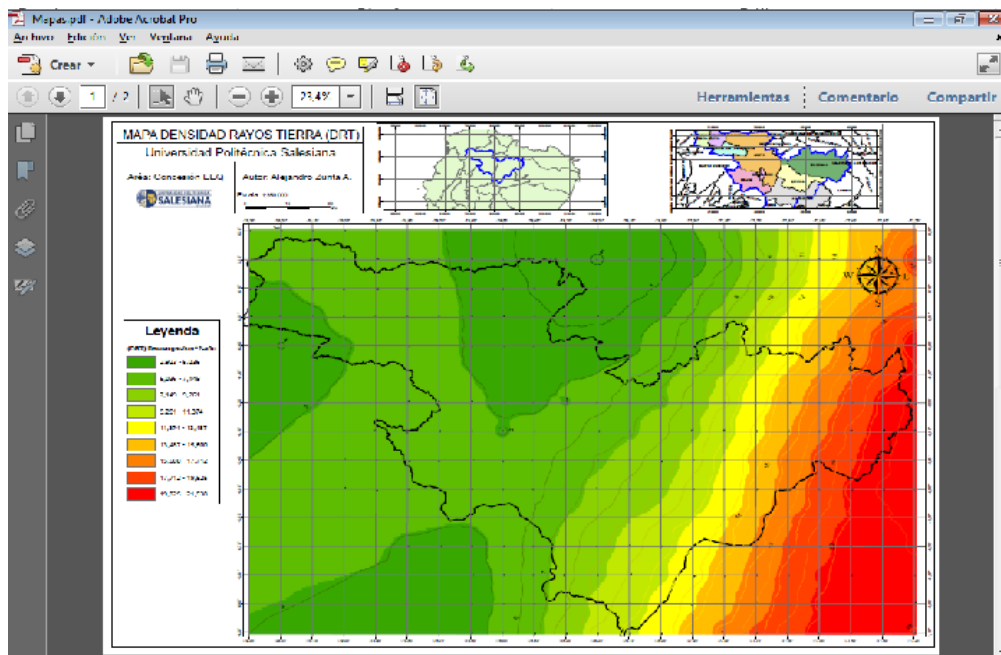


Despliegue de mapas.

Si usted desea observar el mapa isoceráunico y de densidad de descargas atmosféricas, pulse el botón “Mapas”.



A continuación, se desplegará un archivo en formato PDF que está optimizado para poder ser impreso en una hoja A1. El documento incluye los dos mapas.



Información.

Al presionar el botón “? INFO” se desplegará este Manual de usuario. Además de unas ventanas informativas dentro del programa, donde indica un resumen y aspectos importantes sobre los datos.

Repaso_tesis
 Nivel Cerámico EEQ

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

Longitud (X)

Latitud (Y)

EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.
 Siempre junto a ti

Densidad de rayos a tierra (DRT) (GFD)

Nivel cerámico (Td)

Descargas /km²-año

Días con tormenta en el año

Aceptar Limpiar Mapas

Coordenadas UTM

? INFO.

